

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN



PROYECTO FINAL DE CARRERA

**“DISEÑO Y MONITORIZACIÓN DE UNA ESTACIÓN  
MÓVIL MULTISISTEMA EN ENTORNO RURAL”**

Autor: Mounsef Darkaoui

Tutor: Juan Carlos Torres Zafra

Madrid, Julio 2013

# Agradecimientos

---

*Al llegar al final de una de las etapas más importantes de mi vida, me gustaría dedicar algunas palabras de agradecimiento a todas aquellas personas que me han soportado, ayudado y animado durante todos estos años académicos.*

*En primer lugar, al tutor Juan Carlos, gracias por sus aclaraciones y la atención que me ha ofrecido durante la elaboración del proyecto.*

*Por otro lado, a mis padres y hermanos, quienes con su trabajo y esfuerzo han hecho todo lo posible para que este proyecto se haga al fin realidad.*

*Finalmente, mi agradecimiento más sincero a todos mis familiares, amigos, compañeros de carrera y de trabajo, quienes me han apoyado en todo el camino recorrido.*

# ÍNDICE

<b>1.1. La Banda Ancha Móvil en zonas rurales .....</b>	<b>8</b>
<b>1.2. Solución multitecnología “Single RAN” .....</b>	<b>9</b>
<b>1.3. Concepto SDR.....</b>	<b>10</b>
1.3.1. Arquitectura SDR.....	11
1.3.2. Ventajas e inconvenientes .....	12
<b>1.4. Objetivos del proyecto.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1. Acceso Radio Móvil .....</b>	<b>15</b>
2.1.1. Introducción.....	15
2.1.2. Evolución de la telefonía móvil .....	17
2.1.2.1. Componentes asociados al despliegue en “Single RAN” .....	20
2.1.2.2. Estructuras multicapa y femtocélulas.....	23
2.1.2.3. Coexistencia y heterogeneidad en las redes .....	24
2.1.3. Introducción al estándar EDGE .....	26
2.1.3.1. Evolución.....	26
2.1.3.2. Esquemas de codificación.....	27
2.1.3.3. Rendimiento de EDGE.....	29
2.1.4. Eficiencia espectral .....	31
2.1.4.1. Sensibilidad y Pérdidas .....	31
2.1.4.2. Modulación y Codificación.....	33
2.1.4.3. Transmisión por paquetes .....	34
<b>2.2. Arquitectura de la red .....</b>	<b>35</b>
2.2.2. Dimensionamiento de la red .....	35
2.2.3. Técnicas multi-antena.....	37
2.2.4. Red de transmisión totalmente alquilada .....	39
<b>2.3. Arquitectura general de los sistemas 3GPP.....</b>	<b>39</b>
2.3.1. Equipos de Usuario.....	42
2.3.2. Equipos de red e interfaces .....	43
2.3.2.1. Nodos de la red de acceso .....	43
2.3.2.2. Interfaz radio .....	43
<b>3.1 Software empleado en el despliegue .....</b>	<b>47</b>
3.1.1 IQlinkXG.....	47
3.1.2. Google Earth .....	49
3.1.3. iManager M2000 .....	50

3.1.4. MapInfo Professional.....	51
<b>4.1. Metodología del trabajo .....</b>	<b>54</b>
<b>4.2. Zona de Estudio .....</b>	<b>55</b>
<b>4.3. Planificación del emplazamiento.....</b>	<b>58</b>
<b>4.4. Equipos y recursos empleados.....</b>	<b>60</b>
4.4.1. Dispositivo de procesado en banda base BBU 3900 .....	61
4.4.1.1. Módulos de la BBU3900 .....	62
4.4.2. Dispositivo de recursos radio RRU 3900.....	64
4.4.3. Antena Radio.....	65
<b>4.5. Diseño Radio.....</b>	<b>67</b>
4.5.1. Replanteo .....	67
4.5.2. Dimensionamiento .....	68
<b>4.6. Diseño Transmisión.....</b>	<b>69</b>
4.6.1. Línea de vista .....	69
4.6.2. Diseño de Radioenlaces .....	72
4.6.2.1. Características generales .....	73
4.6.2.2. Parámetros de diseño .....	74
4.6.2.3. Objetivos.....	82
<b>4.7. Monitorización y Optimización.....</b>	<b>84</b>
<b>5.1. Resultados obtenidos para la estación del estudio.....</b>	<b>86</b>
<b>6.1. Control de estadísticos y monitorización.....</b>	<b>96</b>
<b>7.1. Presupuesto requerido para el despliegue de la estación base .....</b>	<b>101</b>
<b>8.1. Conclusiones y líneas futuras de trabajo.....</b>	<b>104</b>
<b>Acrónimos .....</b>	<b>105</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>107</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>108</b>
A. Espectro radioeléctrico .....	108
B. Refarming.....	110

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Comparación GPRS-EDGE.....	27
Tabla 2 Time slot por canal en EDGE .....	30
Tabla 3 Distancia máxima del radioenlace en función de la frecuencia y de la polarización .....	87
Tabla 4 Capacidad RE Huawei.....	88
Tabla 5 Máxima potencia de transmisión vs Modulación.....	88
Tabla 6 Resultados de diseño .....	90
Tabla 7 Canales e interferencias para el radioenlace del estudio.....	93
Tabla 8 Presupuesto debido a equipos, tarjetas, conectores y herramientas.....	101
Tabla 9 Presupuesto plataforma elevadora.....	101
Tabla 10 Presupuesto dirección y certificación de red .....	102
Tabla 11 Presupuesto mantenimiento.....	102
Tabla 12 Presupuesto final de la obra.....	102

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Una evolución clara y probada para la Banda Ancha Móvil.....	9
Figura 2 “Single RAN” como solución multitecnología.....	10
Figura 3 Arquitectura SDR.....	12
Figura 4 Evolución de GSM a LTE .....	16
Figura 5 Paradigma de la evolución del mercado de las comunicaciones móviles .....	17
Figura 6 Relación del coste de la red con el volumen de tráfico .....	17
Figura 7 Probabilidad de handover vs. factor de movilidad .....	22
Figura 8 Capacidad resultante del uso conjunto de los recursos radio [5].....	25
Figura 9 Esquemas de codificación GPRS y EDGE .....	28
Figura 10 Diagrama de constelaciones .....	28
Figura 11 Arquitectura de red a nivel lógico.....	36
Figura 12 Interconexión entre elementos.....	37
Figura 13 Tipos de diversidad espacial.....	38
Figura 14 Arquitectura de alto nivel de los sistemas 3GPP. ....	40
Figura 15 Estación Base multiestándar en entorno abierto RAN.....	42
Figura 16 Ilustración de los mecanismos de transferencia de información en la interfaz radio.....	45
Figura 17 Menu principal IQlinkXG.....	47
Figura 18 Imagen de la zona de estudio en Google Earth .....	50
Figura 19 Menu principal iManager M2000 .....	51
Figura 20 Menu principal MapInfo Professional.....	52

Figura 21 Planificación.....	54
Figura 22 Mapa de Castilla La Mancha .....	56
Figura 23 Localización del punto de despliegue de red.....	56
Figura 24 Mapa de estación de telefonía móvil en la población de Terrinches.....	57
Figura 25 Mapa de estaciones de telefonía móvil cercanas a la población de Terrinches .....	57
Figura 26 Coordenadas del emplazamiento. ....	59
Figura 27 Plano catastral de la zona.....	59
Figura 28 Plano catastral del punto de despliegue de red. ....	60
Figura 29 Conexiones BBU 3900. ....	61
Figura 30 Equipo BBU 3900.....	62
Figura 31 Distribución de slots para las tarjetas del BBU3900 .....	62
Figura 32 Configuración BBU3900 para GSM .....	63
Figura 33 Configuración BBU3900 para UMTS.....	63
Figura 34 Configuración BBU3900 para GSM+UMTS .....	63
Figura 35 Equipo RRU.....	64
Figura 36 Instalación RRU. ....	65
Figura 37 Antenas radio.....	66
Figura 38 Diagrama de radiación antena sectorial 120°.....	67
Figura 39 Perfil de transmisión del radioenlace del estudio .....	71
Figura 40 Altura de antenas y zonas de fresnel .....	72
Figura 41 Canalización en la banda de 38 GHz.....	75
Figura 42 Canalización en la banda de 26 GHz.....	75
Figura 43 Canalización en la banda de 23 GHz.....	76
Figura 44 Representación de la zona de Fresnel.....	77
Figura 45 Ruta de transporte seguida desde la estación móvil del estudio hasta la RNC ....	86
Figura 46 Distancia del radioenlace.....	87
Figura 47 Resultados de las modulaciones de referencia y adaptativas .....	91
Figura 48 Análisis de interferencias en IQlink (I) .....	92
Figura 49 Análisis de interferencias en IQlink (II).....	93
Figura 50 Resumen del radioenlace diseñado.....	94
Figura 51 Accesibilidad en voz.....	96
Figura 52 Accesibilidad en datos .....	97
Figura 53 Disponibilidad (downtime) .....	97
Figura 54 Tráfico de voz .....	98
Figura 55 Tráfico de datos.....	98
Figura 56 Tasa de llamadas caídas .....	99
Figura 57 Causas de las llamadas caídas .....	99

---

# Capítulo 1

## Introducción y objetivos

---

La telefonía móvil es uno de los grandes hitos del final del siglo pasado y comienzos del presente, que ha supuesto una auténtica revolución rompiendo con conceptos antiguos. En los años 90 nació el sistema Global System for Mobile Communications 2G (GSM), el cual permitió una mayor seguridad de las comunicaciones y sirvió para abrir el universo de la telefonía móvil al gran público, constituyendo un paso decisivo en la historia de las telecomunicaciones.

Luego evolucionaron hacia la tecnología Universal Mobile Telecommunications System 3G (UMTS) y más tarde pasaron a High Speed Packet Access (HSPA).

La evolución del 2G al 3G llevó casi 15 años y hoy ya estamos hablando de la cuarta generación 4G (LTE) que ofrecerá una mayor velocidad, capacidad y movilidad.

El objetivo que se persigue en última instancia es expandir el número de frecuencias para ampliar la capacidad, optimizar el uso del espectro y conseguir, por tanto, unas mayores tasas de velocidad.

## 1.1. La Banda Ancha Móvil en zonas rurales

La banda ancha móvil es un servicio de internet móvil que ofrecen multitud de proveedores de telefonía móvil, y mediante el cual se puede obtener internet en cualquier lugar y momento siempre que se disponga de cobertura móvil. Ofrece velocidades equiparables a las velocidades de la banda ancha por cable (entre 3 y 42 Mbps dependiendo del operador y del tipo de conexión).

Con mucha frecuencia, se asume que las necesidades de banda ancha se dan en las ciudades y los mercados desarrollados, sin embargo, también está aumentando la demanda en zonas rurales. Esta necesidad muestra otro aspecto de los atractivos de la banda ancha móvil: su potencial en las zonas rurales y remotas para ofrecer una amplia zona de cobertura.

En Europa, un promedio del 93% de personas tienen acceso a una conexión de alta velocidad, pero en las zonas rurales esa cifra se reduce a un promedio de sólo 70%, y en algunos países la diferencia es aún mayor<sup>1</sup>. La banda ancha a través de redes móviles es una buena solución en estos entornos. La buena cobertura sumada a la movilidad que ofrece, es una de las principales ventajas que los operadores móviles utilizan para diferenciarse de los servicios de telefonía fija y sus competidores. En la Figura 1 se puede ver cómo ha ido evolucionando la banda ancha móvil:

---

<sup>1</sup>MYTIC, Nota de Prensa del 20/05/2011: La inclusión de la banda ancha en el servicio universal de telecomunicaciones.



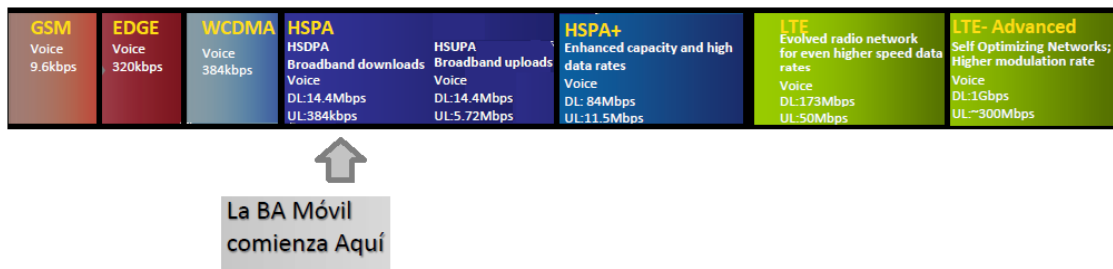


Figura 1 Una evolución clara y probada para la Banda Ancha Móvil

## 1.2. Solución multitecnología “Single RAN”

El “Single Radio Access Network” (Single RAN) es una solución que permite integrar bajo una sola red de telecomunicaciones un acceso móvil multitecnología. Con “Single RAN”, se permite hacer realidad la evolución de la red sin que sea preciso desplegar una nueva infraestructura. Su gran funcionalidad se encuentra en el hecho de que se puede tener 2G y 3G en una misma estructura permitiendo la migración a 4G/LTE de manera sencilla y sin precisar un cambio de la topología ya que se utiliza la misma transmisión, equipos y sistemas de mantenimiento.

Una solución que amortiza la inversión de hoy y prepara la evolución tecnológica del futuro. Bajo esta perspectiva se planteó la solución objeto de estudio del presente proyecto.

Mediante técnicas software se pueden implementar futuros protocolos, extendiendo de esta manera nuestras capacidades. Este principio también es ampliamente utilizado en las comunicaciones. Bajo este enfoque de optimización de recursos nace el concepto de “Single RAN”: una única estación base que soporte todas las tecnologías móviles bajo un interfaz común de mantenimiento.

En este punto aún no se utilizaba el término “Single RAN”, pero el concepto que se puso en marcha era el siguiente: desarrollar una infraestructura común con 2G y 3G utilizando los mismos equipos [1]. Mediante el uso de tecnología “Single RAN” los operadores no tienen que implementar nuevos diseños de radio con nuevas bandas de frecuencia, con el costo adicional de tiempo y esfuerzo realizados por el sitio de adquisición, planificación y ejecución, así como la adquisición potencial de un nuevo espectro, incluida la introducción de nuevas bandas de frecuencia. En su lugar, se puede enfocar su inversión al uso de una única banda de frecuencias en 900 MHz, tanto para 2G como para 3G [2].

En España, desde 2010 los grandes operadores de telefonía móvil han empezado a desplegar este tipo de estaciones. España es un país con zonas rurales bastante grandes con bajas densidades de población y núcleos dispersos. Particularmente, el despliegue de redes “Single RAN” se hace especialmente interesante en núcleos rurales, donde un menor número de personas tienen acceso a conexiones de alta velocidad. Castilla La Mancha, por su demografía, extensión y sus numerosos municipios con poblaciones inferiores a los 1.000 habitantes, se convierte en un candidato idóneo para el despliegue de estas nuevas infraestructuras. Por estos motivos, el proyecto se centrará en el estudio, diseño y monitorización de una nueva Estación Base en un municipio rural de Castilla La Mancha [2].

En la siguiente figura se puede ver el ahorro en espacio y recursos gracias a la solución multitecnología:

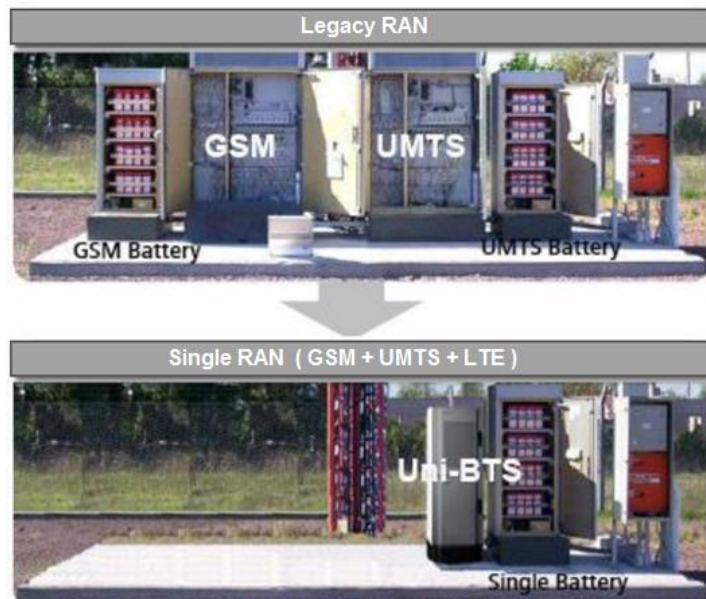


Figura 2 “Single RAN” como solución multitecnología

### 1.3. Concepto SDR

Radio definida por software o SDR es un sistema de radiocomunicaciones donde los componentes típicamente implementados en hardware son implementados en software.

Entendemos por SDR aquel dispositivo radio en el cual algunas de sus funciones de nivel físico (o todas) pueden modificarse por software, lo cual proporciona mayor flexibilidad frente al hardware tradicional, permitiendo que se puedan añadir nuevas capacidades o modificar las existentes sin necesidad de reemplazar el hardware. A través únicamente de actualizaciones software (SDR), sin un nuevo despliegue hardware, las BTS pueden ser actualizadas aumentando sus capacidades. Esta configuración definida por software (SDR) permite a las BTS ser actualizadas desde redes GSM, GPRS y EDGE, HSPA e incluso LTE, utilizando para ello capas de transporte sobre protocolos IP.

Mediante las actualizaciones SDR se logra incrementar la flexibilidad y reducir considerablemente los costes de desarrollo. Otras ventajas que presenta son las siguientes:

- Eliminación de costes de actualización hardware.
- Rápida implementación de nuevas técnicas y capacidades.
- Se elimina el tiempo de instalación hardware y se da soporte a nuevas capacidades de red mediante SDR.

- Uso eficiente del espacio físico y de los recursos energéticos debido a la utilización de unidades de radio (RRU) remotas.

Por otra parte, la enorme evolución en términos de capacidad de computación permite plantear también la separación física de las funcionalidades puramente radio y de procesamiento digital, de manera que la unidad de radio podría estar distribuida en los emplazamientos desplegados sobre todo el territorio mientras que la unidad digital podría ubicarse en un centro de gestión soportando multitud de emplazamientos, unidos por fibra óptica.

El concepto SDR define un conjunto de procedimientos y técnicas orientadas a realizar el procesamiento de señales de información por medio de un dispositivo de propósito general, el cual puede ser modificado mediante software logrando así un cambio dinámico, eficiente y automático entre tecnologías sin tener que incurrir en gastos por concepto de nuevos equipos. Dicho concepto ha ido evolucionando a lo largo de los años, pero los avances conseguidos han partido esencialmente de la misma configuración básica, la cual se compone de tres bloques funcionales: radio frecuencia (RF), frecuencia intermedia (IF) y banda base (BB) (de las cuales RF casi siempre trabaja con hardware analógico mientras que las secciones de IF y BB se implementan con módulos hardware digitales).

- 1) El bloque RF es el responsable de transmitir y recibir las señales de radio frecuencia para adecuarlas y convertirlas en frecuencias intermedias, en el caso de la recepción, o amplificar y modular las señales, adecuándolas para su envío, en el caso de la transmisión.
- 2) El bloque IF es el encargado de pasar la señal de IF a banda base y digitalizarla, en el caso de la recepción, o pasar la señal de banda base a IF y hacer la conversión digital-analógica de la señal, en el caso de la transmisión.
- 3) El bloque Banda Base es el encargado del procesamiento de la señal en banda base (como frecuencias de salto, establecimiento de sesión, entre otros).

### **1.3.1. Arquitectura SDR**

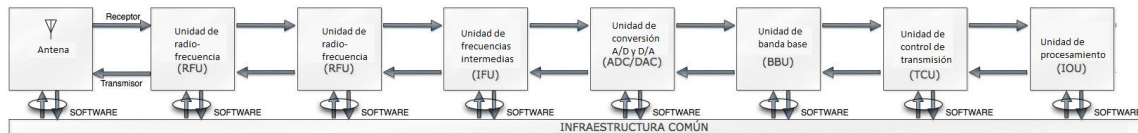
La parte analógica es la encargada de realizar todas aquellas operaciones que no pueden ser efectuadas en el dominio digital, como alimentación a la antena, filtrado y combinación en RF, pre-amplificación, amplificación, y generación de la frecuencia de referencia. La idea de la arquitectura es que las etapas de conversión analógico/digital estén lo más cercanas posible a la antena.

El software del sistema está distribuido en capas de la misma manera que sucede en muchas otras arquitecturas, con el objetivo de hacerlo modular y adaptable al hardware sobre el cual operará. El hardware existente dentro del subsistema digital es el encargado de proporcionar toda la flexibilidad al radio y hacerlo de esta forma más configurable.

La configuración/reconfiguración del hardware presente en el subsistema digital se realiza utilizando software, que de cualquier manera constituye código. Dicho software es desarrollado utilizando diversas metodologías y usando herramientas para escritura de código y simulación de sistemas para efectos de pruebas y validación de los componentes

desarrollados. Esta configuración a medida de los terminales y las estaciones mediante software es el concepto básico de un sistema de radio comunicaciones basado en software.

La Figura 3 representa la arquitectura ideal de SDR. Llamamos “ideal” a dicha arquitectura porque sólo es aplicable en casos en los cuales las tasas de transmisión son bajas y se trabaja en bandas HF/VHF, pero se vuelve mucho más compleja con los sistemas actuales como los desarrollados para acceso fijo y móvil de banda ancha, sistemas móviles de tercera generación, y redes inalámbricas de área regional, todo ello a través de paquetes IP.



**Figura 3 Arquitectura SDR**

### **1.3.2. Ventajas e inconvenientes**

Los sistemas de comunicaciones basados en SDR ofrecen ventajas para los operadores, en cuanto a la facilidad y versatilidad del software para proporcionar nuevos servicios sin necesidad de cambiar los terminales u otros equipos relacionados, y también en otros ámbitos, por ejemplo el ecológico, ya que se puede ver que los residuos industriales se verán reducidos considerando que SDR aumenta el tiempo de vida del hardware. Desde el punto de vista legal, muchos aspectos regulatorios también pueden verse facilitados, especialmente la certificación de terminales teniendo en cuenta que es sólo el software lo que debe certificarse.

Para los usuarios finales, hay también muchas ventajas relacionadas con la calidad de los servicios de soporte por parte de los operadores, ya que las actualizaciones, novedades en los servicios y seguimiento de los usuarios, se realizarán de manera más eficiente. Sin embargo, hay ciertos problemas relacionados con la implementación actual de estas tecnologías que no hay que olvidar, entre ellos, destacamos los siguientes [3]:

1. El volumen de software descargado para los dispositivos reconfigurables es cada vez mayor y exige complejidad en los componentes y como primera consecuencia los tiempos de descarga aumentan considerablemente.
2. El tiempo de configuración de los dispositivos hardware también aumenta con la complejidad.
3. El hecho de que el sistema de radio esté basado en software aumenta la vulnerabilidad de los sistemas frente a virus y otras amenazas.

## 1.4. Objetivos del proyecto

El objetivo de una red de comunicaciones móviles es ofrecer comunicación a los usuarios de telefonía móvil del operador con otro usuario fijo o móvil, ya sea porque el usuario llama o porque recibe una llamada. Es muy importante estudiar la zona donde se quiere instalar la red de comunicaciones móviles, ya que se deberá tener en cuenta en cada punto geográfico cuántos usuarios se espera tener y a cuantos se ofrecerá servicio simultáneamente.

El presente proyecto tiene como principal propósito definir los criterios necesarios para el despliegue de una nueva Estación Base de telefonía móvil multisistema en un municipio rural de Castilla La Mancha.

Alcanzar dicho objetivo dependerá de cómo se desarrollen los siguientes puntos:

- 1) Referencia tecnológica, estudio del sector de las telecomunicaciones e identificación de necesidades y soluciones.
- 2) Análisis de oportunidades, ventajas y extensiones que ofrece la tecnología “Single RAN”.
- 3) Identificación de los procesos y métodos necesarios para el despliegue de una nueva estación base dentro de una red de telecomunicaciones.
- 4) Monitorización de la nueva estación y verificación de los criterios establecidos.

---

## Capítulo 2

# Fundamentos teóricos

---

## 2.1. Acceso Radio Móvil

### 2.1.1. Introducción

Desde sus inicios a finales de los 70, las comunicaciones móviles han revolucionado enormemente las actividades que realizamos diariamente. Los terminales móviles se han convertido en una herramienta primordial para los usuarios particulares y las empresas. A pesar de que la telefonía móvil fue concebida estrictamente para servicios de voz, hoy es capaz de brindar servicios de datos, audio y video.

La 2G desembarcó en 1990 y se caracterizó por ser digital. Los protocolos empleados en los sistemas 2G soportan velocidades de información más altas por voz, pero limitados en comunicación de datos. La tecnología predominante de esta generación es GSM (Global System Mobile). Posteriormente aparece la 2.5 G cuya tecnología predominante es la GPRS (General Packet Radio System) que introduce la conmutación de paquetes en las redes GSM (introduce el mundo IP) y aparecen los MMS (Mensajes Cortos Multimedia);

La 3G se caracteriza por contener la convergencia de voz y datos con acceso inalámbrico a Internet, lo cual la hace apta para aplicaciones multimedia y altas transmisiones de datos. Los protocolos empleados en los sistemas 3G soportan altas velocidades de información y están enfocados para aplicaciones más allá de la voz como por ejemplo audio (mp3), video en movimiento, videoconferencia y acceso rápido a Internet. El estándar que define la tecnología 3G es el UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) [4].

Ahora estamos en los comienzos de una nueva generación de comunicaciones móviles, la cuarta generación o 4G, que tiene como objetivo mejorar la actual 3G y unificar los sistemas para que el cliente tenga un servicio estable en cualquier parte del mundo con el mismo terminal móvil. Además de aumentar considerablemente la velocidad, lo que permitirá una gama más amplia de servicios y facilidades.

El objetivo del 4G (LTE) es proporcionar un acceso de radio capaz de alcanzar velocidades de tráfico de hasta 100Mbps en Downlink y 50Mbps en Uplink. Además ofrecerá menores tiempos de latencia lo que hace reducir los tiempos de acceso a un servicio y la respuesta de la red a cualquier solicitud. Son muchos los cambios que introducirá LTE en relación a los sistemas de comunicaciones móviles previos. Por primera vez, todos los servicios, incluida la voz, se soportan sobre el protocolo Internet Protocol (IP) y las velocidades de la interfaz radio se sitúan en rangos ampliamente superiores a los conseguidos en los sistemas predecesores. Se espera que con LTE se puedan romper finalmente y definitivamente las barreras que todavía impedían la consecución plena de una movilidad con capacidad multimedia. Lo que sería equivalente a afirmar que con la aparición de LTE los usuarios que lo deseen ya no tendrán que verse penalizados en su capacidad de comunicación por el hecho de ser móviles en lugar de fijos. Por este motivo, los equipos de telecomunicaciones móviles deberán estar totalmente preparados para el soporte de implementación del protocolo IP.

En cuanto al aspecto económico, 4G (LTE) incluye costes de despliegue y puesta en marcha del servicio. Los costes de implementación, incluyen la migración de las redes UMTS a las nuevas necesidades, ya que estos cambios no implican cambios radio sino de la jerarquía de la red. Para ello el organismo encargado de la estandarización 3GPP denominado System

Architecture Evolution, trata de encontrar la solución óptima de red capaz de soportar estos cambios [5].

4G (LTE) intenta impulsarse desde IEEE con Wi-MAX 802.16e y posteriormente 802.16m, como solución propiamente IMT-Advanced (sistema 4G), al igual que la propuesta LTE-Advanced por parte del 3GPP. En la Figura 4 se puede ver la evolución de las tecnologías móviles:

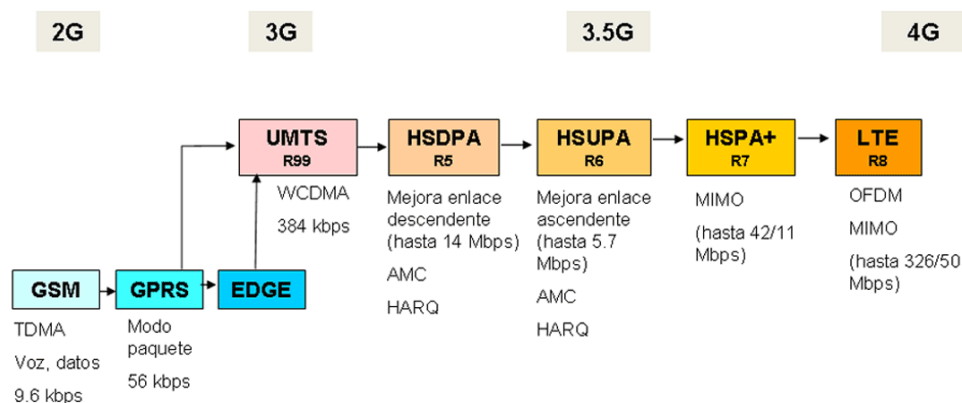


Figura 4 Evolución de GSM a LTE

La clara necesidad de mayores velocidades de transmisión de datos como condición necesaria para el eventual despegue de estos servicios encuentra respuesta en la tecnología HSPA.

El camino apuntado por el 3GPP para cubrir las necesidades tecnológicas en el horizonte 2010-2020 tiene a LTE como máximo exponente. La predominancia de LTE supone el fin del camino paralelo del 3GPP2, que abandona el desarrollo de UMB, equivalente a LTE.

Uno de los principales paradigmas observados en los últimos tiempos es que mientras que el incremento del tráfico de voz supone un incremento de los ingresos del operador al facturarse por establecimiento de llamada y tiempo de ocupación de los recursos del sistema, en el caso del tráfico de datos se produce un desacople entre ambos, asociado a la adopción de tarifas planas. Por otra parte, tal y como se ilustra en las figuras 5 y 6, el coste del despliegue y operación de las redes de comunicaciones móviles con la tecnología actual guarda cierta proporcionalidad con el volumen de tráfico a cursar si se pretende ofrecer una QoS adecuada, de manera que para preservar un cierto margen de beneficio es necesario reducir diferentes componentes de la estructura de costes, lo que constituye una de las principales motivaciones para el desarrollo de un sistema como LTE.





Figura 5 Paradigma de la evolución del mercado de las comunicaciones móviles

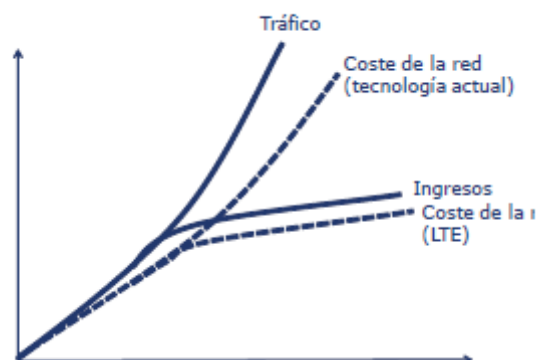


Figura 6 Relación del coste de la red con el volumen de tráfico

### 2.1.2. Evolución de la telefonía móvil

Los dos grandes cambios que han revolucionado la industria de las telecomunicaciones en la última década, la telefonía móvil y el acceso a la red, no se contemplaban ni siquiera como prototipos hace dos décadas. La industria de las telecomunicaciones actual no podría entenderse sin los teléfonos móviles y el acceso a Internet, preferentemente con banda ancha. Pero ambas realidades, no sólo eran totalmente inexistentes para las grandes operadoras de telecomunicaciones, sino que tampoco estaban previstas por sus gurús tecnológicos.

Desde el punto de vista de un usuario de un sistema de comunicaciones móviles, éste contrata el acceso a una serie de servicios, sobre una cierta extensión geográfica y con capacidad de movilidad, a los que asocia un cierto nivel de calidad. Desde el punto de vista del operador de la red, éste debe realizar un ejercicio de dimensionado de red con el fin de satisfacer la demanda agregada del conjunto de usuarios del sistema.

Los sistemas de comunicaciones móviles se han desarrollado empleando tecnologías que extienden el servicio gracias a la superposición de la cobertura móvil de una estación base sobre una determinada zona. Así las tecnologías móviles se emplean en el despliegue de redes que dividen el territorio en celdas para incrementar la capacidad de la red reutilizando las mismas frecuencias en diferentes celdas [6].

Cuando un operador se plantea el despliegue de una red móvil se parte de unos requisitos en cuanto a:

- Cobertura, entendida en términos globales como el territorio al que se pretende dar servicio y en términos particulares como la superficie concreta a la que una estación base debe de prestar el servicio. Dicha cobertura debe entenderse siempre en términos probabilísticos y garantizar la recepción de un nivel de señal adecuado en un cierto % de los emplazamientos en el radio de influencia de una estación base.
- Capacidad, entendida como el tráfico que la red debe ser capaz de soportar. El tráfico en una zona determinada, expresado en <sup>1</sup>Erlangs/km<sup>2</sup>, viene determinado por la densidad de usuarios por km<sup>2</sup> y por el nivel de tráfico generado por usuario. El tráfico soportado por la red viene determinado por la cantidad de recursos radio disponibles así como por la gestión que el operador realice de los mismos.
- Calidad de las comunicaciones, que puede apreciarse de manera subjetiva (calidad de una conversación de voz) o cuantificarse con ciertos parámetros (probabilidad de erros en la conexión, retardo de transmisión).
- Accesibilidad a la red, esto es, el grado de disponibilidad de recursos que tiene un operador cuando un usuario intenta establecer una conexión.

Considérese una densidad de usuarios  $U$  (usuarios/Km<sup>2</sup>), cada uno de ellos generando en término medio un tráfico  $T$  (bits/s/usuario). Para satisfacer esta demanda, considérese que el operador tiene asignado a una estación base dada un ancho de banda  $B$  (Hz), que pretende explotar mediante una tecnología caracterizada por una cierta eficiencia espectral  $E$  (bits/s/Hz). Considérese que una estación base tiene capacidad  $C$  (bits/s/Km<sup>2</sup>) para cubrir una superficie  $S$  (Km<sup>2</sup>). Así, la capacidad  $C$  (bits/s/Km<sup>2</sup>) desplegada por el operador es:

$$C = \frac{B \cdot E}{S} \left[ \text{bits} / \text{s} / \text{Km}^2 \right] \quad (2.1)$$

El dimensionado adecuado corresponde al caso en que la capacidad desplegada por el operador permite cubrir la demanda de tráfico de los usuarios, esto es, cuando:

$$C = \frac{B \cdot E}{S} = U \cdot T \quad (2.2)$$

A partir de la igualdad anterior, se desprende que el aumento de la demanda (por la incorporación de un mayor número de usuarios, aumenta  $U$ , o por el aumento en el uso de las comunicaciones móviles requiere de una respuesta por parte del operador para satisfacer dicha demanda. El equilibrio podría restablecerse:

---

<sup>1</sup>El Erlang es una unidad adimensional utilizada en telefonía como una medida estadística del volumen de tráfico.

- Aumentando el ancho de banda (B), esto es, accediendo a una mayor cantidad de espectro radio eléctrico.
- Aumentando la eficiencia espectral (E), esto es, utilizando una tecnología espectralmente más eficiente.
- Reduciendo la superficie (S), esto es, desplegando una mayor número de estaciones base para reducir la superficie cubierta por cada una de ellas.

La opción más factible en el corto plazo es reducir la superficie (S), ya que el aumento de B tiene latencias de orden de magnitud de años debido al impacto regulatorio y el aumento de E tiene en muchos casos impacto a nivel de estandarización, cuyas latencias también son del orden de magnitud de años. No obstante, la movilidad de los usuarios termina por imponer un límite en el tamaño mínimo que puede tener una celda. En esta situación, se diría que la red móvil ha llegado a su límite de capacidad, y los incrementos de demanda deberían satisfacerse a través de cambios regulatorios que permitieran la asignación de mayor cantidad de espectro (aumentar B) y/o el desarrollo y despliegue de nuevas tecnologías que permitieran mejorar la eficiencia espectral ofrecida por las existentes (aumentar E) [5].

Si bien la componente tecnológica, como es el diseño de la interfaz radio en general y de la capa física en particular, suele ser el aspecto más llamativo y al que se le otorga más espectacularidad asociado a la implantación de cada nueva generación de sistemas de comunicaciones móviles, es en realidad la estrategia de despliegue de la red la que proporciona al operador el mayor grado de flexibilidad y aumento de capacidad. En efecto:

- Respecto a la disponibilidad de espectro, partiendo de los 50 MHz iniciales asignados para 2G (GSM) en la banda de 900 MHz, se añadieron 150 MHz en la banda 1800 MHz y posteriormente 155 MHz en la banda 2100 MHz con la llegada de 3G (UMTS). Es decir, en aproximadamente una década se ha conseguido ampliar en un factor aproximadamente 6 la banda disponible. Estableciendo ahora la referencia en los aproximadamente 350 MHz disponibles en 2G/3G, el factor de expansión esperable, puramente en el sentido de aumento de banda disponible para los sistemas de comunicaciones móviles, es limitado (digamos, un factor del orden de 2 en el mejor de los casos). Así, en la componente espectral, las mejoras deben incentivarse a partir de nuevos modelos que conlleven un uso más eficiente del espectro, superando la perspectiva de disponer propiamente de mayor cantidad de espectro [7].
- Respecto a la evolución de la eficiencia espectral de pico asociada a la tecnología, si tomamos como referencia 2G (GSM) (9.6 Kbit/s sobre una banda de 200 KHz, esto es, 0.05 bits/s/Hz asociados a un usuario), el paso a 3G (UMTS) versión R99 supone un salto hasta 0.4 bits/s/Hz (2 Mbps sobre 5 MHz), mientras que en su versión HSDPA proporciona 3 bits/s/Hz (14 Mbit/s en 5 MHz). Esto es, respecto a la tecnología que hoy en día tenemos operativa y que refleja una evolución tecnológica de unos 15 años, se ha introducido un factor de mejora del orden de 60. Estableciendo ahora la referencia en HSDPA, el salto esperable asociado a 4G (LTE) puede llevar a eficiencias de pico del orden de 5 bits/s/Hz (para el caso 100 Mbit/s sobre 20 MHz) que puede ampliarse a un valor próximo a 16 si se considera modulación MIMO 4x4. Es decir, con respecto a HSDPA, que presenta ya un diseño del enlace radio significativamente sofisticado y eficiente, el factor de mejora esperable con LTE estaría en el rango 2-5 aproximadamente, logrado gracias a la introducción de la modulación MIMO. Cabe mencionar, no obstante, que la discusión en términos de eficiencia espectral de pico no debe tomarse de manera dogmática, ya que en la práctica el usuario no experimenta las prestaciones asociadas a la eficiencia espectral de pico sino la eficiencia espectral media.

- Respecto al tamaño de las células, citar que en el Reino Unido (con una superficie del orden de 250,000 Km<sup>2</sup> y una población de unos 60 millones de habitantes) están desplegadas en 2009, según la aplicación Sitefinder de Ofcom, del orden de 52,000 estaciones base. La capacidad de expansión en este sentido, particularmente considerando el despliegue de femtocélulas, es ciertamente significativa. Por ejemplo, algunas previsiones efectuadas en 2006 pronostican 102 millones de usuarios de femtocélulas sobre 32 millones de puntos de acceso en todo el mundo para 2011 [7].

A partir de estos primeros conceptos básicos, en este capítulo se han elaborado los principios de expansión de la red de acceso radio con el fin de proporcionar una visión panorámica de la evolución de los sistemas de comunicaciones móviles, arrancando en los sistemas 2G (GSM) y pasando por los sistemas 3G (UMTS) hasta llegar al 4G (LTE) [5].

Según lo comentado anteriormente, el operador de red móvil puede expandir la capacidad de la red a través del despliegue de un mayor número de estaciones base, la disponibilidad de mayor cantidad de espectro o el uso de una tecnología más avanzada. La variable preferida a atacar dependerá tanto de la viabilidad y flexibilidad que ofrezcan cada una de ellas así como de consideraciones económicas al respecto de las mismas. Por ejemplo, si un operador pudiera acceder a mayor cantidad de espectro con un coste de las licencias bajo, ésta podría resultar sin duda la opción más atractiva para el operador. Por el contrario, si resultara que el coste de las licencias para la operación en nuevas bandas frecuenciales fuera muy elevado, podría resultarle más interesante explotar una nueva tecnología sobre las bandas que ya tuviera asignadas, siempre que la regulación lo permitiera.

### 2.1.2.1. Componentes asociados al despliegue en “Single RAN”

En términos de despliegue de red, un aumento progresivo de la demanda se cubre con un aumento progresivo de estaciones base. De manera simplificada, podría decirse que, para unos valores de usuarios  $U$  [usuarios/Km<sup>2</sup>], tráfico  $T$  [bits/s/usuario], ancho de banda  $B$  [Hz] y eficiencia espectral  $E$  [bits/s/Hz] dados, el área  $S$  [Km<sup>2</sup>] de cobertura de una célula debería ser:

$$S = \frac{B \cdot E}{U \cdot T} [Km^2] \quad (2.3)$$

### El compromiso entre cobertura y velocidad de transmisión

La teoría de Shannon [8] establece la capacidad máxima que puede obtenerse en la transmisión desde un elemento transmisor hasta otro receptor a través de un canal de comunicaciones afectado por ruido gaussiano:

$$C = B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P}{N} \right) = B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{R_b}{B} \right) \geq R_b \quad (2.4)$$

donde B es el ancho de banda y P/N la relación señal a ruido. A su vez, la potencia de señal recibida P se relaciona con la energía del bit  $E_b$  a través de la velocidad de transmisión  $R_b$ , mientras que la potencia de ruido N se relaciona con la densidad espectral  $N_0$  a través del ancho de banda B.

Por otra parte, la potencia recibida P resulta de la potencia empleada en el transmisor  $P_T$  una vez ha sufrido las pérdidas de propagación  $L(d)$ , que dependen de la distancia, d, existente entre transmisor y receptor:

$$E_b = \frac{P_T}{R_b \bullet L(d)} \quad (2.5)$$

Combinando las expresiones anteriores y expresándolo directamente en escala logarítmica se obtiene:

$$L(d)[dB] \leq P_T[dBm] - N_0[dBm / Hz] - 10 \log([2^{\frac{R_b}{B}} - 1] \bullet B) \quad (2.6)$$

Así pues, suponiendo una cierta densidad espectral de potencia de ruido dada  $N_0$  y una potencia disponible en el transmisor limitada  $P_T$ , las pérdidas máximas de propagación tolerables (y con ello el radio y la superficie cubierta por la célula S [ $Km^2$ ]) se reducen en mayor o menor medida según el ancho de banda disponible B y la velocidad de transmisión  $R_b$  de acuerdo con el último término de la expresión anterior.

### La movilidad como elemento limitativo en el despliegue

Se denomina handover (también handoff) al sistema utilizado en comunicaciones móviles celulares con el objetivo de transferir el servicio de una estación base a otra cuando la calidad del enlace es insuficiente en una de las estaciones. Este mecanismo garantiza la realización del servicio cuando un móvil se traslada a lo largo de su zona de cobertura.

Si se supone un sistema móvil regular con células de radio R [m]. Se modela la distancia que recorre un móvil dentro de una célula como una variable aleatoria con distribución uniforme en el intervalo [0, 2R]. El tiempo de permanencia en la célula,  $\tau$ , si el móvil se desplaza a velocidad uniforme de v [m/s] será también una variable aleatoria. Considerando además que la duración de una conexión,  $\delta$ , puede modelarse como una variable aleatoria exponencial de media D [s], la probabilidad de que un usuario deba efectuar un handover,  $P_h$ , a lo largo de la comunicación vendría dada por [5]:

$$P_h = \int_0^{\frac{2R}{v}} e^{-\frac{\tau}{D}} \frac{1}{2R/v} d\tau = \frac{1}{\alpha} [1 - e^{-\alpha}] \quad (2.7)$$

donde se ha definido el factor de movilidad,  $\alpha$ , como:

$$\alpha = \frac{2 \bullet R}{v \bullet D} \quad (2.8)$$

La Figura 7 muestra esta función, indicando la probabilidad de realizar un handover por parte del usuario:

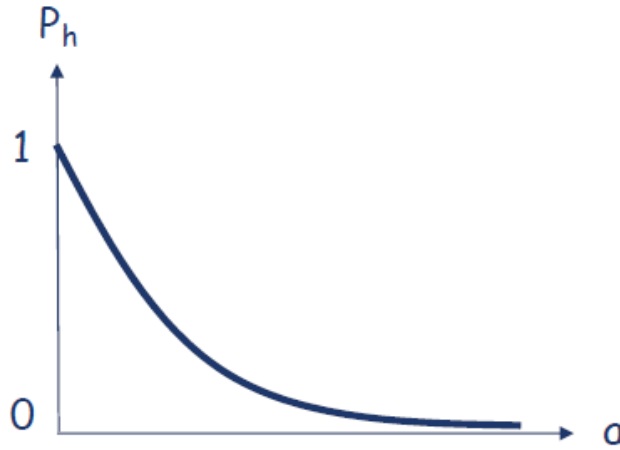


Figura 7 Probabilidad de handover vs. factor de movilidad

1. Cuanto más pequeñas sean las células (menor R).
2. Cuanto mayor sea la velocidad del móvil (mayor v).
3. Cuanto más larga sea la duración media de las comunicaciones (mayor D).

El número medio de handovers que efectuará una comunicación, considerando llegadas de Poisson así como el caso ideal en que el sistema proporciona siempre continuidad a la comunicación sería:

$$\bar{N}_h = \sum_{i=1}^{\infty} i \cdot P_h^{i-1} \cdot (1 - P_h) = \frac{P_h}{1 - P_h} \quad (2.9)$$

Claramente, la expresión anterior indica que si  $P_h$  se aproxima a 1, entonces el número medio de handovers tiende a infinito y el funcionamiento del sistema sería inviable. Esta situación se daría para valores del factor de movilidad tendiendo a 0.

A medida que se reduce el radio de la célula  $R$  aumenta la probabilidad de handover y se reduce el tiempo en que discurre un móvil bajo el área de cobertura de una célula. Puesto que el proceso de señalización asociado al handover requiere de un cierto tiempo para su ejecución además de suponer una carga de señalización sobre la red, el aumento del número de procesos de handover y la reducción del tiempo entre handovers consecutivos puede hacer inviable la operación práctica de la red.

### 2.1.2.2. Estructuras multicapa y femtocélulas

En la práctica, la demanda de tráfico no es uniforme ni en la dimensión espacial ni en la temporal. En cuanto a la dimensión temporal, clásicamente se ha utilizado el concepto de “hora cargada”, de manera que  $U$  y  $T$  se toman como los valores esperados de las funciones dependientes del tiempo en el período en que la red se ve sometida a la mayor carga (p.e. en horario de oficina en entornos de centro de negocios, en horarios pertinentes en entornos de ocio). En cuanto a la dimensión espacial, la distribución de usuarios presenta fuertes diferencias (p.e. en entornos urbanos frente a entornos rurales), con lo que la visión del despliegue de red conlleva la necesidad de células más pequeñas en los entornos de alto tráfico, ampliándose la superficie cubierta por una célula en entornos rurales.

Así, el despliegue clásico en un entorno urbano hace uso de las denominadas estructuras móviles jerárquicas, en las que se combinan macrocélulas, situadas típicamente en las azoteas de los edificios y proporcionando células de mayor superficie, microcélulas, situadas a pocos metros del suelo con superficies de cobertura más reducidas, y picocélulas, situadas en interiores de edificios y con unos pocos metros de cobertura. De esta manera, las estructuras móviles jerárquicas proporcionan flexibilidad en el despliegue de red y pueden entenderse como inherentemente ligadas a la estrategia de despliegue del operador, con lo que se ha utilizado intensivamente ya desde las primeras fases de 2G (GSM) [9].

Por otra parte, nótese que las estructuras móviles jerárquicas permiten la introducción de mecanismos de gestión de recursos radio que reduzcan el número de handovers que deben realizarse en la red, mediante una apropiada asociación de los usuarios a las distintas capas de células según sea su grado de movilidad. Así por ejemplo, resultaría más adecuado soportar una comunicación desde un coche en movimiento a través de macrocélulas que no a través de microcélulas, ya que en este último caso deberían realizarse handovers muy frecuentemente. En definitiva, se trataría de evitar que los usuarios que presenten una velocidad  $v$  elevada vean reducido su factor de movilidad mediante la asignación a una célula que presente un mayor radio  $R$ . Una posible manera de estimar la movilidad de los terminales es precisamente a través de la observación de su tasa de handovers (esto es, si se observa que una conexión ha requerido varios handovers en un breve período de tiempo, puede asumirse un alto grado de movilidad al usuario e intentar traspasar esta comunicación a una macrocélula del entorno).

En el contexto de una red 2G (GSM) en la que el tráfico es básicamente voz, las microcélulas y picocélulas responden a la necesidad de satisfacer a una fuerte concentración de usuarios, esto es,

$$S = \frac{B \bullet E}{U \bullet T} [Km^2] \quad (2.10)$$

debe reducirse debido a que  $U$  (usuarios/km<sup>2</sup>) es muy elevado. No obstante, con la llegada de HSPA y el uso masivo de acceso a Internet, se incrementa significativamente el volumen de

tráfico generado por usuario, con lo que aparece la necesidad de reducir  $S$  a causa del incremento de  $T$ .

La propia evolución de los terminales (por ejemplo, smartphones..) y sus funcionalidades conlleva también un aumento de tráfico significativo. Ello deriva en la aparición del concepto de femtocélula, en el que se concibe el despliegue de una estación base de bajo coste por usuario. En este caso, la femtocélula se plantea para proporcionar un enlace vía radio al usuario desde cualquier ubicación en su entorno doméstico y la propia femtocélula proporciona conectividad a través de una conexión ADSL. Tenga en cuenta que, al estar la movilidad del usuario confinada en su entorno doméstico la mayor parte del tiempo de utilización del servicio, la problemática de los handovers no aparece como elemento limitativo, aunque  $S$  pueda resultar muy reducida. Así, las femtocélulas en el marco de los sistemas 3G avanzados permitirán que los usuarios puedan gozar de las velocidades de transmisión de pico, sin malgastar capacidad de red para penetrar en interiores, donde se genera gran parte del tráfico a cursar. Otra ventaja que pueden aportar las femtocélulas es que pueden hacer uso de las bandas de frecuencia más altas al tener asociadas coberturas limitadas.

### 2.1.2.3. Coexistencia y heterogeneidad en las redes

Muchos operadores están preocupados acerca de que sus equipos 3G (UMTS) y 2G (GSM) puedan coexistir en el mismo sitio desde los puntos de vista de radio e interferencias. En el equipo multiestándar en el que los módulos 3G (UMTS) y 2G (GSM) comparten el mismo bastidor asegura que todos los problemas han sido estudiados y resueltos. Además, el hecho de que los mismos módulos sean usados por estaciones base individuales muestra que las estaciones base pueden ser instaladas en cualquier lugar en donde otras estaciones base se encuentran ya operativas.

El despliegue de la nueva tecnología “Single RAN” comporta la operación de una nueva tecnología, aumentando así el grado de heterogeneidad en los escenarios típicos de comunicaciones móviles. Así, en el caso habitual del despliegue “Single RAN” coexisten las redes 2G (GSM) y 3G (UMTS/HSPA). La explotación de la heterogeneidad de redes de acceso radio requiere lógicamente de la capacidad de inter-operación entre las mismas.

Con el nacimiento del 3G (UMTS) se despertó un gran interés en el estudio de las ganancias que podrían alcanzarse con la explotación conjunta de los recursos radio correspondiente a redes heterogéneas, a través de los denominados mecanismos de Common Radio Resource Management (CRRM). En este sentido, las estrategias de selección de red y handover vertical entre redes GERAN/UMTS permiten conseguir mejoras de capacidad significativas. No obstante, cuando las redes heterogéneas incluyen redes de alta velocidad como HSPA, la ganancia de capacidad debida a la explotación conjunta de las redes deja de ser un elemento destacable, ya que la gran diferencia de prestaciones entre las distintas redes hace que la aportación de las redes GERAN/UMTS sea poco significativa. Ello puede entenderse fácilmente a partir del siguiente ejemplo [10]:

Considérese la función clásica <sup>1</sup>Erlang-B para evaluar la capacidad  $C_1$  soportada por el Sistema #1 que dispone de  $M_1$  canales con una cierta probabilidad de bloqueo,  $P_B$ .

---

<sup>1</sup>Erlang-B (a veces también escrito sin el guion Erlang B), también conocida como la fórmula de pérdida de Erlang, deriva de la probabilidad de bloqueo de la distribución de Erlang para describir la probabilidad de pérdida de llamada en un grupo de circuitos



Considérese el Sistema #2 con  $M_2$  canales y la misma probabilidad de bloqueo, soportando una capacidad  $C_2$  en el mismo escenario. Caso de que este escenario de redes heterogéneas se explotara sin capacidad de interoperación entre las redes, la capacidad total alcanzable sería  $C = C_1 + C_2$ , con  $C_1 = \text{ErlangB}(M_1, P_B)$  y  $C_2 = \text{ErlangB}(M_2, P_B)$ . Por el contrario, si las redes tuvieran la facilidad de interoperación entre ellas, la capacidad alcanzable sería  $C = \text{ErlangB}(M_1 + M_2, P_B)$ .

La Figura 8 muestra la ganancia de capacidad que se consigue con una gestión conjunta de los recursos radio con respecto a una gestión independiente para cada red, esto es:

$$G = \frac{\text{ErlangB}(M_1 + M_2, P_B)}{[\text{ErlangB}(M_1, P_B) + \text{ErlangB}(M_2, P_B)]} \quad (2.11)$$

Se observa claramente que la ganancia es muy elevada cuando el número de canales es bajo. A medida que aumenta el número de canales (aumenta la capacidad) la ganancia se reduce, limitándose al 10% aproximadamente para los mayores valores mostrados.

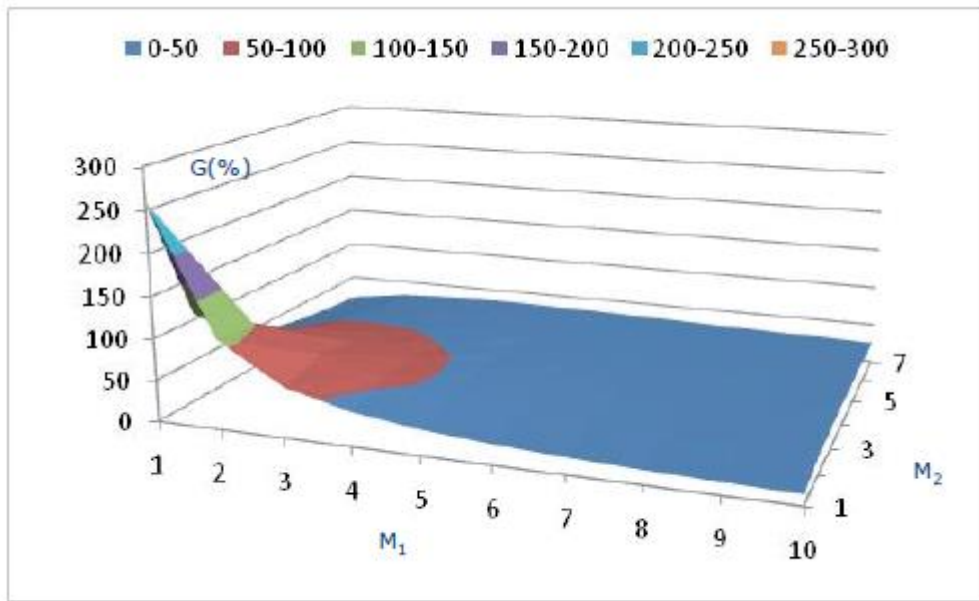


Figura 8 Capacidad resultante del uso conjunto de los recursos radio [5]

En cualquier caso, y aunque como se ha ilustrado la ganancia de CRRM en términos de capacidad esperable es discreta, la explotación de la heterogeneidad de las redes sigue siendo un aspecto de gran importancia en el marco del despliegue de las nuevas redes de telecomunicaciones. En efecto, por una parte las redes legacy (redes tradicionales) pueden seguir cursando tráfico asociado a diferentes servicios y así continuar la amortización de las inversiones en estas redes, de manera similar a lo ocurrido en su día con el despliegue de UMTS y la continuidad en el uso de la red GSM para cursar tráfico de voz. Por otro lado, el

hecho de que las redes legacy ya proporcionen cobertura extensa en el territorio, con disponibilidad ubicua de voz con GSM/UMTS y datos con HSPA, permitir á un despliegue más flexible de los eNodeB de nuevas redes, centrándose al menos inicialmente en la provisión de cobertura en “hot zones”.

### **2.1.3. Introducción al estándar EDGE**

El estándar EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution) es la evolución del estándar GSM que modifica el tipo de modulación. Al igual que el estándar GPRS, está pensado para ser una transición hacia la tercera generación de la telefonía móvil (3G). También se utiliza el término 2.75G para describir el estándar EDGE.

A continuación se va a analizar la evolución del sistema EDGE, fundamental en el estudio del proyecto, ya que la estación base desplegada se implementa mediante esta tecnología radio.

#### **2.1.3.1. Evolución**

Las redes GSM ya habían avanzado en la transmisión de datos a una tasa de 9.6 Kbps y la transmisión de mensajes cortos (servicio SMS). Más tarde se hicieron mejoras con la introducción de HSCSD (High Speed Circuit Switched Data), con capacidad multi-slot y 14.4 Kbps por time-slot. Las tasas teóricas de ambos servicios eran de 64 Kbps para HSCSD y 160 Kbps para GPRS [11].

EDGE, introducido en redes operativas en 2003, mejora la tasa de transferencia (throughput) en un time-slot para ambos servicios HSCSD y GPRS. La evolución de HSCSD se denomina ECSD (Enhanced Circuit Switched Data) mientras que para GPRS pasa a llamarse EGPRS (Enhanced General Packet Radio Service). En ECSD, aun triplicándose la capacidad de un time-slot, la tasa máxima no supera los 64 Kbps. De igual manera, en EGPRS, se triplica la capacidad de un time-slot alcanzándose picos de hasta 473 Kbps usando los 8 time-slot de la trama TDMA. La clave de conseguir esta eficiencia espectral reside en una nueva técnica de modulación combinada con mecanismos de adaptación al enlace [5].

GPRS y EGPRS tienen diferentes formas de operar y diferentes protocolos en el subsistema BSS, comportándose de la misma manera en el núcleo de la red, es decir, EGPRS se puede entender como un añadido a la infraestructura desplegada para el servicio GPRS. Desde sus orígenes en la década de 1990, más del 80% de los usuarios de todo el mundo utilizan GSM como medio de conexión y cada mes se suman a este grupo 40 millones de nuevos usuarios. Como tecnología móvil, la estandarización y crecimiento de GSM ha crecido enormemente y todas estas características han sido heredadas por el EDGE. La tendencia apunta a que hasta el año 2020 se continuará utilizando GSM/WDCMA, lo cual repercute directamente en el uso de EDGE.

Una de las propiedades inherentes a la red GSM es la calidad de la señal recibida y percibida por el usuario, que varía en función de la distancia a la estación base, la intensidad de la señal y las interferencias. EDGE mejora esta percepción debido a la modulación utilizada. Estandarizado por el 3GPP como parte de la familia GSM/WDCMA, EDGE es una mejora de la interfaz radio GPRS que ofrece un alto rendimiento y aumento en la capacidad de las redes de comunicación. Esto es posible gracias a los métodos de modulación, codificación y transmisión

que utiliza, aumentando las tasas de bit por canal. Aunque GPRS y EDGE comparten la misma tasa de símbolos, el número de bits de modulación difiere. EDGE puede transmitir tres veces el número de bits que GPRS transmite en un mismo instante. Esta es la principal razón de las elevadas tasas a las que es capaz de transmitir EDGE. Las diferencias entre las tasas de bits de usuario y radio son el resultado de tener o no en cuenta las cabeceras de los paquetes de datos. Esto, a veces, constituye un error a la hora de evaluar la tasa de transferencia útil.

La implementación y evolución hacia el EDGE por parte de las operadoras se ha convertido en una obligación dada su alta capacidad de servicios de datos basados en GSM. Actualmente, más del 75% de los nuevos terminales GSM y más del 98% de los terminales de nueva generación y HSPA/UMTS soportan EDGE y se ha establecido como una solución de acceso a internet en redes de datos 2G, ofreciendo tasas superiores a 250kbps con una latencia de 150ms, suficiente para cualquier servicio de datos hoy en día, especialmente en núcleos de población más rurales [5].

En la Tabla 1 se muestra una comparación entre las tecnologías GPRS y EDGE.

	<b>GPRS</b>	<b>EDGE</b>
<b>Modulación</b>	GMSK	8-PSK/GMSK
<b>Tasa de símbolos</b>	270 Ksimb/seg	270 Ksimb/seg
<b>Tasa de bits</b>	<b>270 Kbps</b>	<b>810 Kbps</b>
<b>Tasa de bits radio por time-slot</b>	22.8 Kbps	69.2 Kbps
<b>Tasa de bits de usuario por time-slot</b>	<b>20 Kbps (CS4)</b>	<b>59.2 Kbps (MCS9)</b>
<b>Tasa de bits de usuario en 8 time-slots</b>	160 Kbps	473.6 Kbps

**Tabla 1 Comparación GPRS-EDGE**

El siguiente paso en la evolución de los sistemas móviles GSM/EDGE consiste en la mejora de los servicios relacionados con la conmutación de paquetes acompañada de una mayor alineación con los servicios proporcionados por UMTS/UTRAN (Universal Mobile Telecommunication System / UMTS Terrestrial Radio Access Network).

GERAN (GSM/EDGE Radio Access Network) basado en las altas tasas de transmisión de EDGE y en la interfaz radio GPRS, proporciona soporte para todos los grados de calidad de servicio (QoS) definidos en UMTS: interactividad, background, streaming y conversacional. Con esto, un nuevo rango de aplicaciones multimedia IP son soportadas.

### **2.1.3.2. Esquemas de codificación**

Para GPRS están definidos cuatro esquemas de codificación distintos: CS1, CS2, CS3 y CS4. Cada uno tiene una cantidad diferente de código de corrección de error optimizado para distintas condiciones radio. Para EGPRS fueron diseñados nueve esquemas de codificación, del MCS1 al MCS9, con la misma idea que los cuatro de GPRS. Los cuatro primeros esquemas EGPRS (MCS1 a MCS4) usan GMSK, mientras que los demás (MCS5 a MCS9) usan la

modulación 8-PSK. La Figura 9 muestra los esquemas de codificación de GPRS y EDGE con las tasas de usuario máximas.

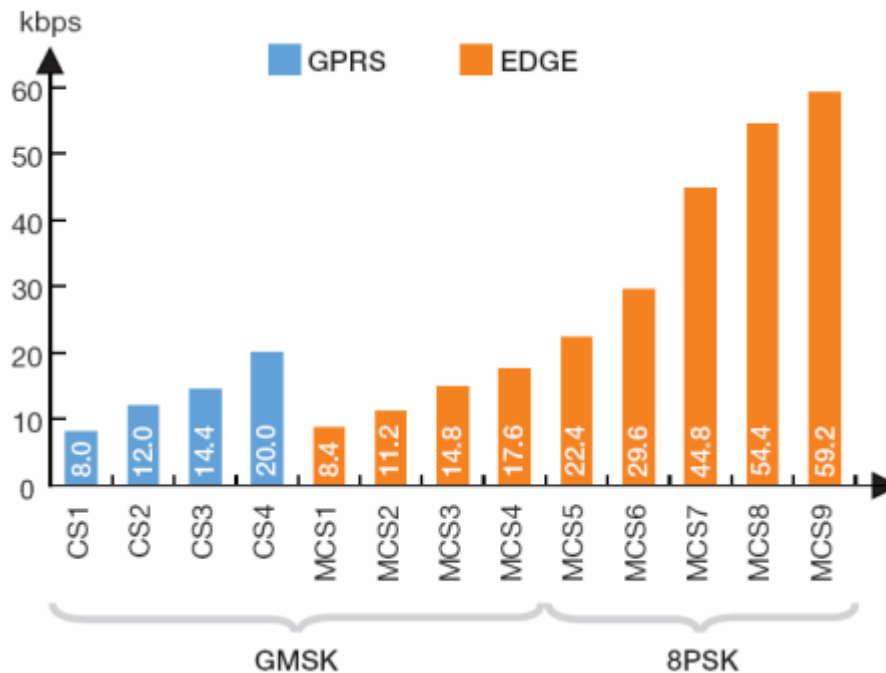
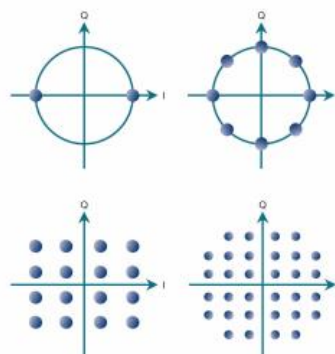


Figura 9 Esquemas de codificación GPRS y EDGE

Llegamos a la conclusión de que EDGE es cuatro veces más eficiente que GPRS. Las tasas de bit mostradas son por time slot, actualmente los terminales pueden recibir hasta cinco time slot.

Con EDGE se introducen las modulaciones 8 Phase Shift Keying (8-PSK), 16 QAM y 32 QAM, aumentando el número de bits por símbolo, tal como se muestra en la Figura 10, 8-PSK es un método de modulación avanzado que soporta tres veces más cantidad de información que una constelación convencional.



Top left: Gaussian minimum-shift keying (GMSK) – 1 bit per symbol. Top right: Octonary phase shift keying (8-PSK) – 3 bits/symbol. Bottom left: 16QAM: 16-level constellation – 4 bits/symbol. Bottom right: 32QAM: 32-level constellation – 5 bits/symbol.

Figura 10 Diagrama de constelaciones

Toda sesión de datos de un terminal EDGE en una celda con EDGE activado, usará los esquemas de codificación entre MCS-1 y MCS-9, que pueden ser modulación GSMK y 8-PSK. En función de la calidad del interfaz radio, C/I, se usará un esquema de codificación u otro, y de esto dependerá del caudal (throughput) máximo por time slot. La sesión de datos se adapta al canal disponible que asegura la transmisión.

Para conseguir implementar esta tecnología, simplemente es necesario una actualización software de la red GSM/GPRS, sin tener que redefinir las ubicaciones o espectros y sin ser necesaria una modificación de la estructura móvil de la red. Por este motivo, cientos de redes han sido actualizadas a EDGE consiguiendo nuevos servicios y accesos a internet de forma más rápida.

Como se puede comprobar, es la misma topología que una red GSM/GPRS. El núcleo de los nodos GPRS, Serving GPRS Support Node (SGSN) y Gateway GPRS Support Node (GGSN) son prácticamente independientes de las tasas de bit empleadas y no es necesaria una actualización Hardware. En la interfaz radio, los terminales conectados a la estación base necesitan ser compatibles con EDGE y el software de la estación base y de la Base Station Controller (BSC) debe ser actualizado para ser compatible con EDGE.

### **2.1.3.3. Rendimiento de EDGE**

Debido al crecimiento explosivo de Internet y la subsiguiente demanda de las comunicaciones de datos haciendo uso de dispositivos inalámbricos, el sistema EDGE proporciona la conmutación de circuitos para las comunicaciones de voz mediante el sistema ECSD (Enhanced Circuit Switched Data) y la conmutación de paquetes de datos por medio del EGPRS (Enhanced General Packet Radio Service).

EGPRS utiliza modulación 8-PSK para los esquemas de codificación del MCS-5 al MCS-9 para permitir tasas de datos más altas que GPRS. Las cabeceras de los radio bloques en EGPRS se codifican de forma robusta. La red EGPRS puede seleccionar de forma automática el esquema de codificación más apropiado dependiendo de las condiciones del enlace radio con el objetivo de maximizar el throughput.

En cuanto al rendimiento de EGPRS se estudia el retardo en función del tamaño de paquete utilizado y la tasa media de bits por slot de tiempo, permitiendo tasas de pico más altas con respecto al estándar GSM. La eficiencia del enlace en EGPRS se estudia, en general, en términos de la tasa de errores de radio-bloques (BLER) y el caudal (throughput) por time slot para los diferentes esquemas de codificación y modulación. La mejora de la capacidad de los datos en EGPRS se fundamenta en las mejoras del nivel de enlace y, por tanto, es de importancia su estudio.

El rendimiento de EDGE depende de la configuración del interfaz Abis (interfaz entre BTS y BSC). Con FIX Abis la trama del Abis está estructurada de antemano y cada recurso en el aire tiene preasignado su recurso en el Abis. Es lo predominante actualmente en el 2G. Con Flex/Dynamic Abis la trama del Abis se va ocupando de forma consecutiva en función de los recursos ocupados en el aire. El resto se puede ocupar por tramas EDGE siempre que haya suficientes TS libres. La tendencia es ir a FULL IP y olvidar la configuración FIX Abis en TDM.

A continuación mostramos el número de Time Slot (TS) utilizados en Abis suponiendo un usuario EDGE con 4 PDCHs, donde FIX TS son los TS definidos en el Abis que dependen del número de TRX disponibles en la estación base y IDLE T son los TS adicionales que hay que definir en el Abis para cada estación base.

		<b>FIX TS - 4 PDCHs</b>	<b>IDLE TS - 4 PDCHs</b>	<b>TS total</b>
GPRS	CS1-CS2	1	0	1
	CS3-CS4	1	1	2
EDGE	MS1-MS2	1	0	1
	MS3-MS6	1	1	2
	MS7	1	2	3
	MS8-MS9	1	3	4

**Tabla 2 Time slot por canal en EDGE**

Analizando la Tabla 2 llegamos a las siguientes conclusiones:

- Para MCS 1 - MCS 2: Cada PDCH necesita 16 kbps. (1 usuario necesita 1 TS 64 kbps).
- Para MCS 3 - MCS 6: Cada PDCH necesita 32 kbps. (1 usuario necesita 2 TS de 64 kbps).
- Para MCS 7: Cada PDCH necesita 48 kbps. (1 usuario necesita 3 TS de 64kbps).
- Para MCS 8 y MCS 9: Cada PDCH necesita un TS de 64 kbps completo. (1 usuario necesita 4 TS de 64 kbps).

El cálculo teórico de capacidad de una Celda con EDGE activado depende de:

$$Capacidad = N^{\circ}TS \bullet VelocidadTrama \quad (2.12)$$

Con 4 TS dedicados en Abis (FIX ABIS), y usando esquemas de codificación MCS9 se obtiene:

$$Capacidad = 4TS \bullet 64Kbps = 256Kbps \quad (2.13)$$

Este resultado teórico que resulta ser 100 MBytes/hora de descarga en DL, son unos 40 ó 50 Mbytes/hora en la práctica.

Desde el punto de vista práctico el throughput máximo por usuario dependerá de las condiciones Radio, y de las disponibilidad de recursos en la Radio y en el Abis. Con buenas condiciones radio y con terminales de multislot capability 4DL/2UL (la mayoría), el throughput máximo que se obtiene es de 200 kbps en DL y 100 kbps en UL.

## 2.1.4. Eficiencia espectral

### 2.1.4.1. Sensibilidad y Pérdidas

UMTS y GSM son tecnologías móviles diferentes, operando en frecuencias diferentes. Las señales de alta frecuencia de radio están sujetas a una mayor pérdida de señal en el trayecto que a una frecuencia inferior, lo que significa que, en igualdad de condiciones, las celdas a 2.100 MHz son más pequeñas que las de 900 MHz.

La velocidad más rápida de UMTS permite descargas de información más rápidas que GSM. Adicionalmente, GSM se basa en la División de Tiempo de Múltiple Acceso (TDMA), mientras que UMTS se basa en División de Códigos de Múltiple Acceso (CDMA). Esto significa que los teléfonos CDMA enrutan sus llamadas sobre varias frecuencias al mismo tiempo, mientras que los teléfonos TDMA utilizan un canal fijo sencillo para cada llamada. Hoy en día, WCDMA de 2.100 MHz es perfectamente capaz de ofrecer el mismo radio de cobertura que GSM en 900 MHz. Este es el resultado de una combinación de factores, incluyendo un mejor rendimiento en términos de antena, la tecnología disponible y la sensibilidad de los teléfonos móviles. WCDMA utiliza Code Division Multiple Access (CDMA), mientras que GSM usa Time Division Multiple Access (TDMA). Estas tecnologías tienen características propias que tienen un impacto en la sensibilidad de los receptores utilizados. TDMA permite a varios usuarios compartir el mismo canal de frecuencia dividiendo la señal en diferentes intervalos de tiempo (TS). Los dispositivos de usuario transmiten en rápida sucesión, uno tras otro, cada uno con su propio TS. Esto permite que múltiples dispositivos (teléfonos móviles normalmente) compartan el mismo medio de transmisión (o canal de radio frecuencia), utilizando únicamente una parte de la capacidad total disponible del canal.

En los sistemas de espectro ensanchado, los datos ocupan un ancho de banda más grande de lo necesario, y el código se utiliza para lograr la difusión del ancho de banda antes de la transmisión. El mismo código se utiliza para demodular los datos en el extremo receptor. Los datos se modulan por una señal de difusión que utiliza más ancho de banda que la señal de datos.

El ancho de banda de ruido en un sistema GSM es de 200kHz, que es el ancho de banda efectivo del canal. El ancho de banda de ruido en WCDMA es menor, ya que se reduce la ganancia de procesamiento: para la voz, la ganancia de procesamiento para una codificación de 12.2kbps es 23.9dB, lo que reduce el ancho de banda efectivo a 15.6kHz. Por lo tanto, la diferencia en el ancho de banda de ruido efectivo entre las redes GSM y WCDMA es 200/15.6 o 11dB.

El valor C/I necesario (y utilizado para la planificación en GSM) es típicamente 9 dB, y especificado como las condiciones asociadas a una estación móvil en movimiento a 50km/h en un entorno urbano. Con el fin de estimar la cobertura de un terminal móvil a una velocidad de movimiento lenta (unos 3km/h), las pérdidas de Rayleigh (causadas por zonas de sombra de obstáculos como edificios por ejemplo) deben tenerse en cuenta, sobre todo para la asignación de frecuencias estáticas. Basándose en la experiencia, cuando los usuarios van a 3 km/h es necesario un margen de 3 dB; es decir, C/I aumenta a 12 dB. El valor necesario C/I que se utiliza para la planificación en WCDMA es similar a lo que se utiliza en GSM. Las principales diferencias son que el aumento de handover mejora la C/I para WCDMA y el control de potencia compensa las pérdidas de Rayleigh por lo que es innecesario añadir compensación para estas pérdidas. El alto ancho de banda ocupado por las señales de espectro ensanchado

WCDMA ofrece diversidad de frecuencia, es decir, una baja probabilidad de encontrarse con graves desvanecimientos sobre el ancho de banda total de la señal.

La relación C/I, incluido el margen de interferencia, para WCDMA es 5dB mejor que en GSM, así pues, el nivel de C/I requerido para WCDMA es aproximadamente 7 dB. En resumen, la diferencia total entre GSM y WCDMA para una misma frecuencia es de 16 dB (diferencia de ancho de banda de ruido + la diferencia en la relación C/I requerida). El sistema GSM utiliza normalmente una mayor potencia de emisión que WCDMA, tanto en el UL como en el DL. En el DL, la potencia de emisión para el GSM es típicamente 42.5dBm en la toma de la antena, en comparación con los 33.6dBm de WCDMA. En el UL, la potencia de emisión típica para móviles GSM es 33dBm, en comparación con 24dBm para WCDMA.

La FSPL “Free Space Path Loss” es proporcional al cuadrado de la frecuencia de la señal de radio, así como al cuadrado de la distancia entre el transmisor y el receptor, de la siguiente manera [12]:

$$FSPL = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (2.14)$$

Siendo,

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.15)$$

donde:

- $\lambda$  es la longitud de onda de la señal (en metros).
- $f$  es la frecuencia de la señal (en Hz).
- $d$  es la distancia desde el transmisor (en metros).
- $c$  es la velocidad de la luz en el vacío, 3,108 metros por segundo.

Típicamente, es común medir  $f$  en unidades de MHz y  $d$  en km, en cuyo caso la ecuación se convierte en:

$$FSPL(dB) = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 32,44 \quad (2.16)$$

A partir de la fórmula anterior se puede deducir que aumentan las pérdidas en la trayectoria en 6 dB por cada duplicación de la frecuencia. Por lo tanto, la diferencia de frecuencia entre 2.100 MHz en WCDMA y GSM a 900 MHz ofrece unas pérdidas FSPL de 7.2dB.

Las pérdidas en los interiores de los edificios son mayores en las frecuencias más altas. Este comportamiento reduce el área de cobertura en interiores para frecuencias WCDMA de 2.100 MHz.



La medición de las pérdidas en el interior de los edificios debe ser evaluada como la pérdida de señal resultante de la suma entre la pérdida de la señal en su camino por el aire y la pérdida en el interior del edificio. Las señales llegan al edificio desde diferentes lugares a través de las paredes, techos y suelos y la señal resultante de pérdidas es la suma de todas ellas. Según la práctica, las pérdidas en el interior de los edificios ronda los 2-3dB de media.

#### **2.1.4.2. Modulación y Codificación**

La codificación del canal se basa en añadir redundancia a los datos generados por la codificación de la fuente de forma que se detecten e incluso se corrijan algunos errores introducidos por el canal que suponemos que contiene un ruido blanco gaussiano aditivo.

El proceso de codificación del canal normalmente se compone de dos codificaciones sucesivas. Primero se aplica un código bloque y luego se aplica un código convolucional. En GSM se aplican estas dos técnicas de codificación, pero sólo a unos determinados bits.

La ráfaga GSM está compuesta por un total de 148 bits, que finalmente se transmiten sobre el canal radio con una modulación binaria GMSK. Parte de los bits se dedican a procedimientos de nivel físico como la sincronización y la ecualización, y otra parte son propiamente datos de usuario que se dedica a incorporar redundancia mediante un proceso de codificación de canal para permitir la corrección de errores en recepción. En el caso de GSM, se define un único esquema de codificación de canal para la transmisión de la información de voz, y se aplica dicho esquema a todas y cada una de las ráfagas transmitidas para todos y cada uno de los usuarios del sistema.

Sin embargo en muchas situaciones prácticas la inclusión de los bits de redundancia resulta altamente beneficiosa para mejorar la fiabilidad del enlace, también es cierto que en otras ocasiones (por ejemplo un usuario que se encuentre muy próximo a la estación base y con visión directa a la misma) esta redundancia no sería necesaria. En estos últimos casos, si pudieran transmitirse bits de información de usuario en lugar de bits de redundancia se conseguiría mejorar la eficiencia espectral del sistema. Esta mejora ya se incorpora en GPRS, que introduce 4 esquemas de codificación de canal, con el fin de poder aprovechar las condiciones favorables. El concepto anterior puede también extenderse a la modulación del canal, de manera que EGPRS permite la transmisión bien en GMSK (1 bit por símbolo de canal) bien en 8-PSK (3 bits por símbolo de canal). De acuerdo con esto, en EGPRS se definen hasta 9 esquemas de modulación y codificación (MCS). Así por ejemplo, MCS-1 utiliza GMSK y codificación de tasa 0,53, MCS-3 utiliza tasa de código 0.8 y MCS-9 utiliza 8-PSK y tasa de código 1.0 (es decir, sin redundancia).

En el caso de HSDPA, se recogen y amplían los conceptos anteriores. Por ejemplo, HSDPA permite el uso de modulación 16-QAM. Y en LTE, se recogen los conceptos anteriores y se mejoran sus capacidades. Las modulaciones que LTE considera son: QPSK, 16-QAM y se amplía también a la posibilidad de utilizar 64-QAM.

### 2.1.4.3. Transmisión por paquetes

Modo circuito consiste en las funciones que se necesitan para establecer, mantener, y cerrar una conexión de circuito conmutado en un canal de usuario. Por otra parte, el modo paquete, consiste en las funciones que se necesitan para establecer una conexión de circuito conmutado en un nodo de conmutación de paquetes.

En GSM la transmisión de voz sobre la interfaz radio se lleva a cabo en modo circuito, ya que a un usuario determinado se le asignan unos recursos fijos (en este caso la transmisión de un total de 24 ráfagas en un período de 120 ms) desde el inicio hasta el fin de la comunicación. La transmisión en modo circuito resulta apropiada en el caso en que las fuentes de tráfico generen información de manera continuada, ya que así se aprovechan los recursos asignados. En el caso de que las fuentes de tráfico sean discontinuas la operación en modo circuito resulta un desaprovechamiento de recursos, ya que un usuario determinado puede desperdiciar la oportunidad de transmisión debido a que no tiene información que transmitir a la vez que otro usuario puede tener tráfico para inyectar al canal pero no dispone de recursos para la transmisión.

El acceso a Internet constituye un claro ejemplo de tráfico a ráfagas, con lo que se hace necesario incorporar otra estrategia para sustentar la comunicación, en este caso la transmisión en modo paquete. GPRS supone el primer exponente en la transmisión en modo paquete y su implantación a finales de los años 90 viene motivada por las expectativas en aquel momento de la explosión del acceso a Internet a través del móvil.

En una transmisión por paquetes la asignación de recursos a usuarios es flexible y, por tanto, tiene la capacidad de adaptarse a las necesidades de cada momento. Ello es posible gracias a la sofisticación de los mecanismos de gestión de recursos radio, que incorporan una nueva funcionalidad denominada “packet scheduling” que se encarga de decidir la asignación dinámica a usuarios. En GPRS, esta funcionalidad se implementa en la BSC.

En cuanto al 3G, HSDPA supone la incorporación de la transmisión en modo paquete sobre la interfaz radio, permitiendo en su primera implantación una velocidad teórica máxima de 14.4 Mbits/s (conseguible con 15 códigos OVSF en paralelo, modulación 16-QAM y sin codificación de canal). El aumento de la velocidad de transmisión sobre la interfaz radio conlleva la conveniencia de reducir las referencias temporales del sistema para evitar una pérdida de eficiencia. Así por ejemplo, en HSDPA se introduce una duración de la trama de 2 ms frente a los 10 ms de UMTS.

La relevancia de la transmisión en modo paquete queda evidenciada en LTE, ya que LTE no proporciona canales dedicados sino únicamente un canal compartido en downlink (DL) y otro en uplink (UL).

## 2.2. Arquitectura de la red

La arquitectura de la red de acceso radio (RAN, Radio Access Network) ha sido tradicionalmente jerárquica, formada por un conjunto de estaciones base (BTS en GSM, NodeB en UMTS) conectadas a un nodo controlador (BSC en GSM, RNC en UMTS) [9].

Tanto en GSM como en UMTS, las estaciones base realizan funciones de transmisión y recepción de las señales, pero no se les atribuyen mecanismos de gestión, decisión y control.

La evolución de las funcionalidades y capacidades de la interfaz radio tiene implicaciones sobre la arquitectura de la red, requiriendo también una evolución en la misma. Por ejemplo, en el caso de HSDPA, el algoritmo de “packet scheduling” pasa a implementarse en el NodeB en lugar de hacerlo en la RNC con el fin de reducir el retardo “round trip delay” (se evita el retardo asociado a la interfaz Iub entre NodeB y RNC) y así permitir una mayor efectividad del algoritmo de packet scheduling dependiente de las condiciones radio. La implementación del packet scheduling en el NodeB en HSDPA marca un primer hito en la descentralización de funciones en la RAN.

Extendiendo el camino iniciado por HSDPA, la estación base de E-UTRAN, denominada eNodeB, ejecuta todos los protocolos de la interfaz radio, tanto del plano de usuario como del plano de control, y lleva a cabo toda la gestión de la interfaz radio. Además del mencionado packet scheduling, la interfaz radio LTE incorpora también mecanismos H-ARQ que combinan la corrección de errores en recepción a través de la incorporación de redundancia (FEC) con la retransmisión de paquetes (ARQ) a partir de códigos detectores de errores.

### 2.2.2. Dimensionamiento de la red

Existen dos tipos de redes básicas en cualquier red de comunicaciones sectorizada: la red troncal y la red de acceso. La función de la red troncal es comunicar las diferentes redes de acceso de las diferentes zonas por donde se extiende la red del operador, para conmutar las comunicaciones que se establecen entre ellas.

A continuación se presenta más detalles acerca de los elementos que forman parte de la arquitectura de los sistemas móviles:

- 1) **Red de acceso:** se encarga de comunicar los diferentes elementos de una determinada zona. El tamaño lo determina el operador en función del tráfico existente. Esta red tiene la función de comunicar las MSCs con las BSCs y las BSCs con las BTSs, de modo que la red tenga un correcto funcionamiento y permita que cualquier usuario de la red pueda mantener una comunicación con quien él desee. La red de acceso es la responsable de gestionar el uso de los recursos radio disponibles para la provisión de servicios portadores de forma eficiente. La activación de los recursos de transmisión en la red de acceso se controla generalmente desde la red troncal. La red de acceso está formada por estaciones base y, en los sistemas móviles actuales, 2G y 3G, también por equipos controladores de las estaciones base.

- 2) **Red troncal:** se encarga de comunicar las diferentes redes de acceso de las diferentes zonas por donde se extiende la red del operador, para conmutar las comunicaciones que se establecen entre ellas, controlando de esta manera el acceso a la red móvil, la gestión de las sesiones de datos o circuitos que transportan la información de los usuarios, mecanismos de interconexión con otras redes, la gestión de la movilidad de los usuarios, etc..
- 3) **Equipos de usuario:** es el dispositivo que permite al usuario acceder a los servicios de la red, éste puede incluir una tarjeta inteligente (Universal Integrated Circuit Card, UICC) que contenga la información necesaria para permitir la conexión a la red y la utilización de sus servicios. Se conecta a la red de acceso a través de una interfaz radio.

Esta arquitectura genérica ha sido adoptada en las diferentes familias de sistemas móviles 2G y 3G, y también se mantiene en el sistema LTE.

En la Figura 11 se muestran los distintos elementos que conforman la red:

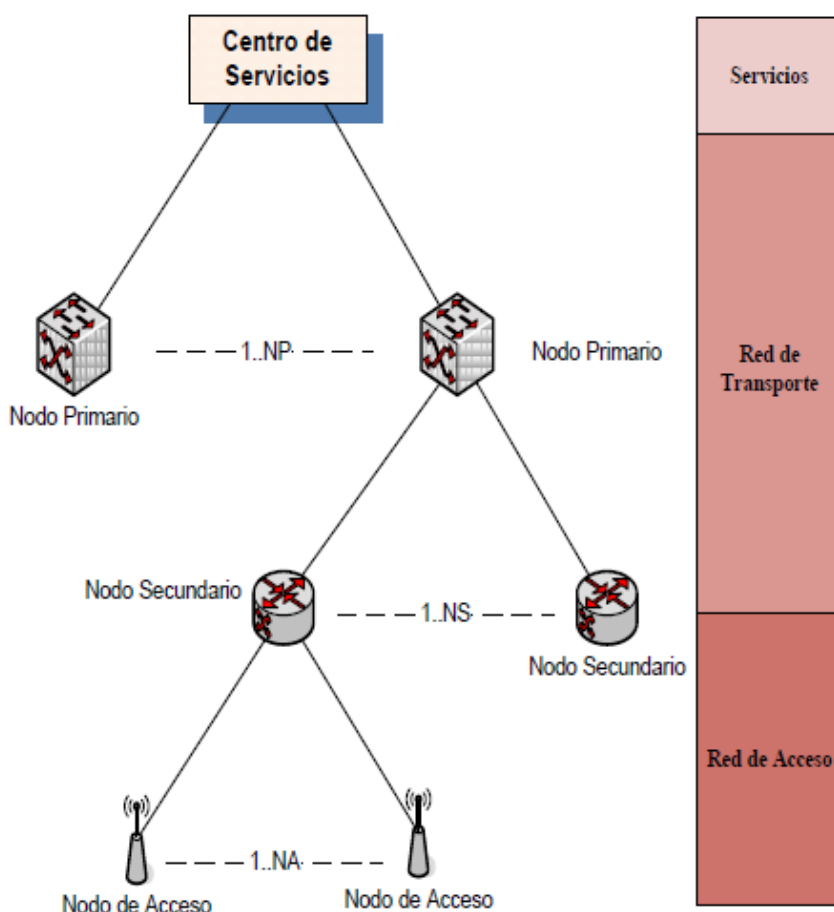


Figura 11 Arquitectura de red a nivel lógico.

Se puede tratar cada red de acceso como un conjunto de redes independientes, las cuales se comunican mediante una global, la llamada red troncal del operador. La comunicación de cada red de acceso con la global o con cualquier otra externa se realiza mediante GMSCs.

Aunque se trate de diferentes redes, sólo debe interpretarse a nivel lógico. A nivel físico, ambas redes pueden compartir los recursos, es decir, pueden compartir el mismo tramo de fibra óptica o cualquier otro medio de comunicación.

Para poder afrontar diferentes situaciones de las redes de transmisión de los operadores móviles y ver cuál sería la evolución de la red, es necesario estudiar diferentes soluciones desde el punto de vista de la inversión y del pago anual a proveedores. En la Figura 12 se puede ver la interconexión de los distintos elementos que forman la red:

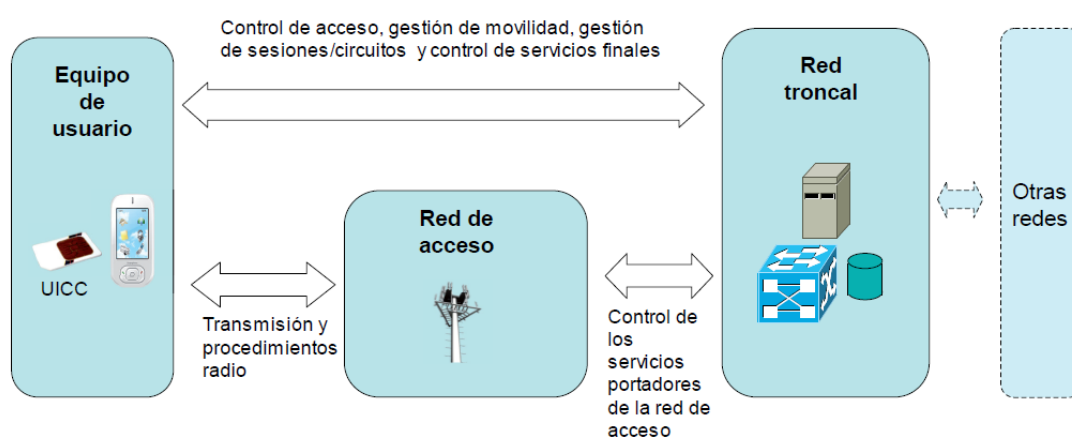


Figura 12 Interconexión entre elementos.

### 2.2.3. Técnicas multi-antena

Las técnicas multi-antena (MIMO) se refieren en general a estructuras de transmisión y/o recepción que utilizan diversas antenas acompañadas de técnicas de procesamiento de señal con distintos niveles de complejidad.

Un sistema MIMO utiliza las ventajas presentadas en la diversidad espacial. La cual es conseguida debido a la separación espacial, obtenida por las antenas, dentro un ambiente con desvanecimiento multitrayecto. Las configuraciones utilizadas en la implementación de sistemas MIMO, presentan ganancia de diversidad, que permite combatir el desvanecimiento de la señal y también para obtener una ganancia en capacidad del sistema.

Estos sistemas pueden ser explorados de varias formas, para mejorar el desempeño. El uso de MIMO en los estándares inalámbricos, incluyendo WiMAX, esta principalmente motivado para el incremento en la velocidad de transmisión, obtenida a través de la multiplexación espacial (múltiples antenas).

Alternativamente, MIMO puede ser implementado como acceso de canal HSDPA (High Speed Downlink Packet Access), el cual es parte de la norma UMTS (Universal Mobile Telecommunication System).

Esfuerzos preliminares están siendo direccionados para definir MIMO como estructura de transmisión en los sistemas WNG (Wireless Next Generation).

Generalmente hay tres categorías de técnicas MIMO. La primera apunta a mejorar la eficiencia de potencia por maximización de la diversidad espacial. Tales técnicas incluyen diversidad de atraso, STBC (Space Time Block Codec), STTC (Space Time Trellis Codec). El segundo tipo utiliza aproximaciones en las capas para incrementar la capacidad. Un ejemplo popular de tales sistemas es el V-BLAST (Vertical-Bell Laboratories Layered Space-Time), donde las señales son transmitidas sobre antenas para aumentar la velocidad de transmisión, pero usualmente no es alcanzada una diversidad total. El tercer tipo explota el conocimiento del canal en el transmisor. Utiliza información del canal para realizar un pre y post filtraje en el transmisor y receptor, lo cual permite alcanzar una ganancia en capacidad. Se pueden ver en la Figura 13 los tipos de diversidad espacial:

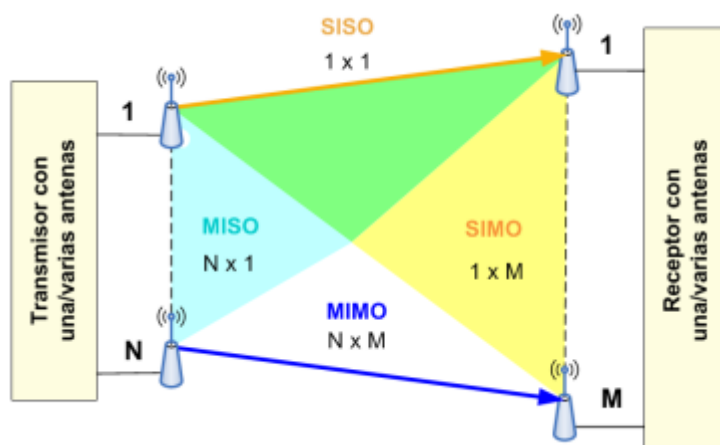


Figura 13 Tipos de diversidad espacial.

Permiten mejorar las prestaciones del sistema, bien sea aumentando la capacidad (más usuarios por célula), mejorando la cobertura o mejorando la velocidad de transmisión por usuario. Mientras que este tipo de estructuras multi-antena no resultaban todavía viables para la implementación práctica en el momento en que se estandarizó UMTS, sí resultan posibles para su incorporación tanto en HSPA+ como en LTE, suponiendo un salto cuantitativo importante en las cotas de eficiencia espectral alcanzables<sup>1</sup>

Los diferentes aspectos mencionados anteriormente tienen, en definitiva, una misma motivación: conseguir el diseño y explotación de una interfaz radio lo más eficiente posible, soportado por una red de acceso que presente también la arquitectura más apropiada.

## 2.2.4. Red de transmisión totalmente alquilada

Cuando un operador se crea no posee gran cantidad de capital para poder afrontar grandes inversiones, por lo que se suele comprar sólo lo que no se puede alquilar, es decir, se compran los equipos necesarios para las comunicaciones y se alquilan todos los enlaces y emplazamientos.

Los diferentes operadores de fibra unen para cada enlace dos puntos de la geografía, entregando o tomando la señal en dominio eléctrico. Su red se encarga de realizar la transformación en el mundo óptico y transportarlo.

De cada enlace alquilado de 2MB (Megabytes) se conoce un extremo, es decir, la BTS que dará servicio, quedando por indicar el punto de la red donde queremos que nos entreguen la señal.

El uso de concentradores está pensado para ser utilizado en entornos donde se utilizan radioenlaces, ya que suelen ser puntos altos (los edificios altos de la zona o torres elevadas respecto a las edificaciones que lo rodean) donde hay visibilidad con varias BTS, por lo que es factible la instalación de un radioenlace entre los dos puntos. Además, al ser un punto donde las señales eléctricas tienen acceso o salida a la fibra mediante un elemento conversor como un conmutador Surpass Hit o un equipo radio Traffic Nodo, cuantas más señales E1 lleguen más se aprovecha la inversión en equipamiento.

El uso de radioenlaces implica aumentar fuertemente la inversión a realizar para el despliegue de la red o, si ya disponen de enlaces alquilados, para el cambio de ésta. Por tanto, este cambio en la red se puede ir haciendo paulatinamente, aumentando poco la inversión anual y reduciendo mínimamente el coste anual total de los alquileres.

## 2.3. Arquitectura general de los sistemas 3GPP

Las arquitecturas de red contempladas en la familia de sistemas especificados por 3GPP en la norma 3GPP 23.002 se adaptan a la arquitectura genérica descrita en el apartado anterior. Así pues, tal como se representa en la Figura 14, los sistemas 3GPP abarcan la especificación del equipo de usuario (User Equipment, UE) y de una infraestructura de red que se divide de forma lógica en una infraestructura de red troncal (Core Network, CN) y una de red de acceso (Access Network, AN).

---

<sup>1</sup>Fuente: Grupo de Investigación en Comunicaciones del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Federal de Santa Catarina: <http://www.revistasbolivianas.org.bo>

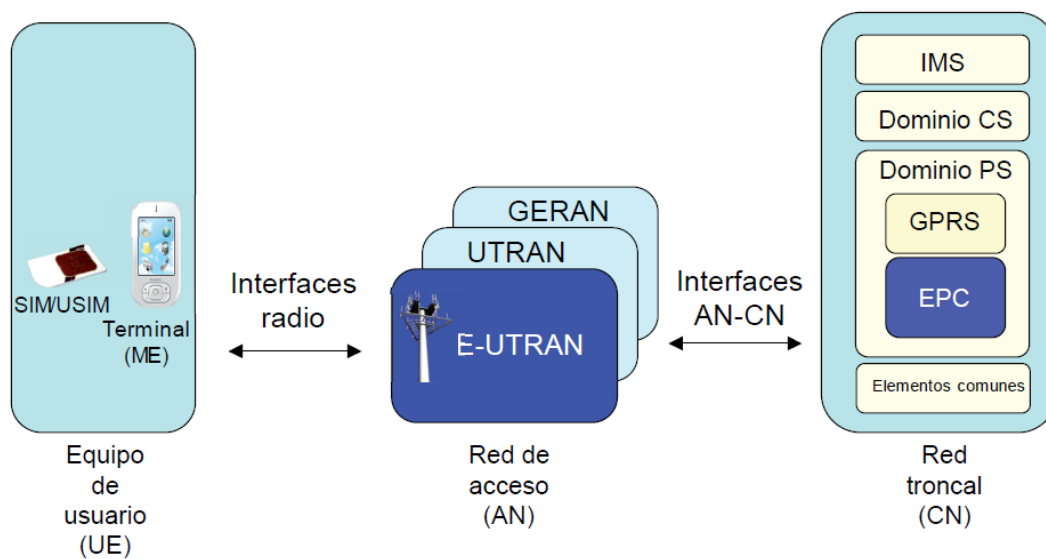


Figura 14 Arquitectura de alto nivel de los sistemas 3GPP.

El equipo de usuario en 3GPP se compone de dos elementos básicos: el propio dispositivo móvil o terminal (denominado como Mobile Equipment, ME, en las especificaciones) y una tarjeta UICC. La tarjeta UICC, también denominada SIM (Subscriber Identity Module) en sistemas GSM y USIM (Universal SIM) en UMTS y LTE, es la encargada de almacenar la información y sustentar los procedimientos que tienen que ver con la suscripción del usuario a los servicios proporcionados por la red. Mediante esta separación entre terminal y tarjeta se permite que un usuario (identificado a través de la SIM/USIM) pueda utilizar diferentes terminales para acceder a la red.

Respecto a la red de acceso, 3GPP ha especificado tres tipos de redes de acceso diferentes: GERAN (GSM/EDGE Radio Access Network), UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network) y E-UTRAN (Evolved UTRAN). Las redes de acceso GERAN y UTRAN forman parte del sistema 3G UMTS mientras que E-UTRAN es la nueva red de acceso del sistema LTE. Cada red de acceso define su propia interfaz radio para la comunicación con los equipos de usuario: GERAN, también denominada de forma habitual simplemente como GSM, utiliza un acceso basado en TDMA, la tecnología utilizada en UTRAN es WCDMA y, E-UTRAN ha apostado por la tecnología OFDMA. Asimismo, la interconexión de las redes de acceso a la red troncal se realiza mediante interfaces AN-CN específicas a cada una de ellas.

Respecto a la red troncal, ésta se divide de forma lógica en un dominio de circuitos (Circuit Switched, CS, Domain), un dominio de paquetes (Packet Switched, PS, Domain) y el subsistema IP Multimedia (IP Multimedia Subsystem, IMS).

El dominio CS alberga a todas las entidades de la red troncal que participan en la provisión de servicios de telecomunicación basados en conmutación de circuitos; es decir, servicios a los que se les asignan recursos de forma dedicada (circuitos) en el momento de establecimiento de la conexión, manteniéndose éstos hasta la finalización del servicio (e.g., servicios de voz y videoconferencia en redes UMTS). El dominio de circuitos de la red troncal es accesible a través de las redes de acceso UTRAN y GERAN. En cambio, el diseño de E-UTRAN no



contempla el acceso al dominio CS ya que todos los servicios se proporcionan a través del dominio PS.

El dominio PS incluye a las entidades de la red troncal que proporcionan servicios de telecomunicación basados en conmutación de paquetes: la información de usuario se estructura en paquetes de datos que se encaminan y transmiten por los diferentes elementos y enlaces de la red. En particular, el dominio PS proporciona un servicio de conectividad a redes de paquetes (e.g., redes IP y X.25). Existen dos implementaciones diferentes del dominio PS: GPRS y EPC. GPRS es la implementación del dominio PS que se desarrolló inicialmente en el contexto de redes GSM y que actualmente también forma parte del sistema UMTS. Los servicios de conectividad por paquetes de GPRS son accesibles tanto a través de UTRAN como de GERAN. Por otro lado, EPC es la nueva especificación del dominio PS desarrollada en el contexto del sistema LTE. EPC es una implementación evolucionada de GPRS que ha sido optimizada para proporcionar un servicio de conectividad IP a los equipos de usuario a través de E-UTRAN. El dominio EPC también ha sido concebido para soportar el acceso al servicio de conectividad IP desde las otras redes de acceso 3GPP (UTRAN y GERAN) así como desde redes no 3GPP (e.g., redes CDMA2000, Mobile WiMAX, etc.).

En la red troncal existen también elementos que soportan funciones asociadas a los diferentes dominios. Un ejemplo claro es la base de datos que contiene la información de los usuarios del sistema (HSS, Home Subscriber Server) y sobre la que se sustenta la operación de los dominios CS y PS, así como del subsistema IMS que comentamos a continuación.

También como parte de la red troncal, el subsistema IMS comprende los elementos de ésta relacionados con la provisión de servicios IP multimedia basados en el protocolo SIP (Session Initiation Protocol) de IETF (Internet Engineering Task Force). El subsistema IMS es responsable de la señalización asociada a los servicios multimedia y utiliza como mecanismo de transporte los servicios de transferencia de datos proporcionados por el dominio PS (i.e., el equipo de usuario y los equipos del subsistema IMS o redes externas se comunican entre sí a través del servicio de conectividad IP ofrecido por el dominio PS). En este sentido, el subsistema IMS constituye el plano de control de dichos servicios quedando claramente separadas las funciones asociadas al transporte de la información (funciones asociadas al dominio PS) y las funciones propias de la capa de control de los servicios (señalización a nivel de aplicación). Esta separación entre las funciones de transporte y las de control de los servicios adoptada en LTE está en consonancia con los trabajos desarrollados en otros organismos de estandarización como ETSI (TISPAN) y ITU-T (NGN-GSI) respecto a la especificación de las arquitecturas de los futuros sistemas de telecomunicación basados íntegramente en redes de conmutación de paquetes y que responden a la denominación de Next Generation Networks (NGN).

La arquitectura completa de la familia de estándares 3GPP se proporciona en la especificación TS 3GPP 23.002.

En la siguiente figura, se puede ver la configuración de red de una estación base multiestándar en un entorno RAN:

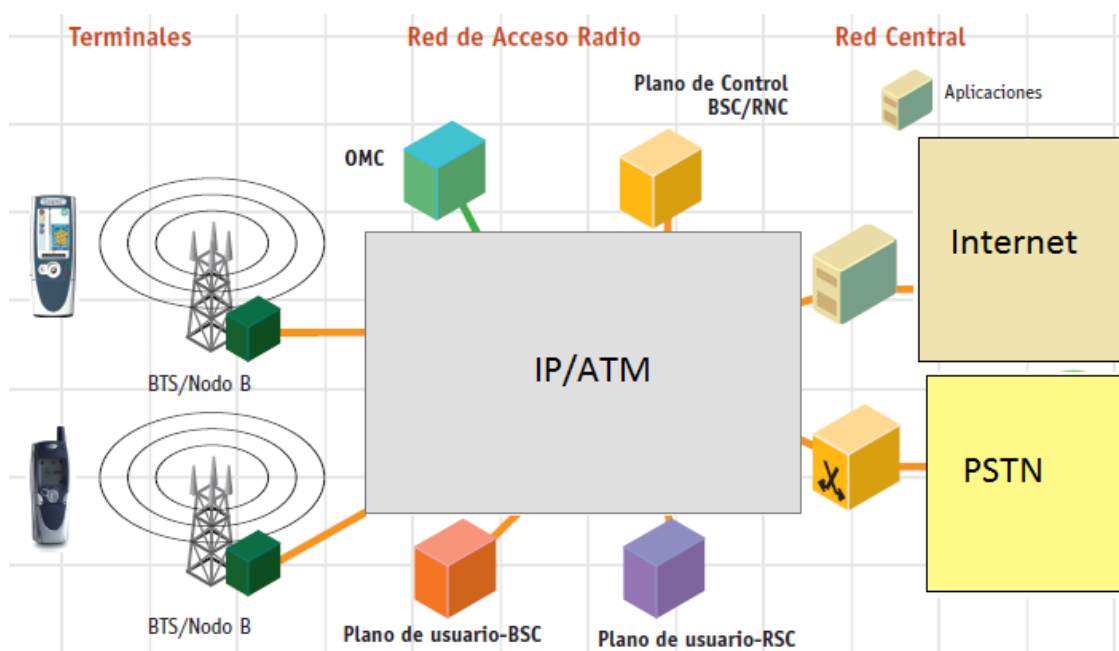


Figura 15 Estación Base multiestándar en entorno abierto RAN

### 2.3.1. Equipos de Usuario

El equipo de usuario es el equipo que permite a los usuarios de un sistema de telecomunicaciones acceder a los servicios de la red a través de la interfaz radio. La arquitectura funcional de un equipo de usuario en el sistema LTE es la misma que en su momento se definió para los sistemas GSM y que se adaptó posteriormente para UMTS. El equipo de usuario (User Equipment, UE) contiene dos elementos básicos: un módulo de subscripción del usuario (SIM/USIM) y el equipo móvil propiamente dicho (Mobile Equipment, ME). Adicionalmente, las funciones del equipo móvil se agrupan en dos entidades funcionales: la terminación móvil (Mobile Terminal, MT) y el equipo terminal (Terminal Equipment, TE). A continuación se describen cada uno de ellos.

El módulo de subscripción de usuario se materializa mediante el uso de una tarjeta inteligente (UICC) que contiene la aplicación que gestiona los datos de subscripción de los usuarios a las redes 3GPP. La aplicación utilizada para acceder a redes GSM se denomina SIM (Subscriber Identity Module), mientras que para el acceso a redes UMTS se conoce como UMTS SIM (USIM). Además de las aplicaciones SIM y USIM, la tarjeta UICC puede contener también una aplicación denominada ISIM (IP Multimedia Services Identity Module) para almacenar los datos necesarios para la operación de los servicios IMS (e.g., direcciones SIP del usuario). La SIM/ USIM está asociada a un usuario y por tanto es quien le identifica en el sistema independientemente del equipo móvil utilizado. La separación entre USIM y ME facilita que un usuario pueda cambiar de terminal manteniendo su identidad. Muchas veces los términos tarjeta inteligente, SIM y USIM se utilizan de forma equivalente. Estrictamente, la tarjeta inteligente únicamente se refiere al circuito integrado y sus capacidades de comunicación y procesado (elementos hardware/software).

Como entorno de procesado que es, una tarjeta inteligente puede ejecutar diferentes aplicaciones, y dos de ellas son la SIM y USIM. Dichas aplicaciones contienen una estructura de datos (e.g., IMSI del usuario, áreas de seguimiento, etc.) y un conjunto de rutinas específicas

(e.g., soporte del mecanismo de autenticación). El diseño de estas aplicaciones se realiza de forma que se garantice compatibilidad con los sistemas previos. Así, una tarjeta con una aplicación USIM, o tarjeta USIM, puede ser utilizada para acceder a una red GSM. En el caso del sistema LTE, se ha mantenido la misma compatibilidad, y además, la aplicación correspondiente sigue denominándose USIM.

El equipo móvil (ME) integra las funciones propias de comunicación con la red móvil así como las funciones adicionales que permiten la interacción del usuario con los servicios de la red (nótese que un usuario puede ser una persona o bien otro dispositivo electrónico). En este sentido, de cara a introducir un cierto grado de flexibilidad en el diseño del equipo móvil, se ha definido una interfaz que permite que exista una separación física entre el equipo que alberga las funciones propias de la comunicación (MT) y el equipo que se ocupa de la interacción con el usuario (TE), y que puede contener multitud de aplicaciones adicionales no directamente relacionadas con el sistema de comunicaciones móviles. Dicha interfaz consiste en la especificación del conjunto de comandos AT que permiten acceder a los servicios de la red (e.g., establecimiento de una conexión en la red UMTS) soportados en el MT desde el TE (norma 3GPP TS 27.007).

## **2.3.2. Equipos de red e interfaces**

### **2.3.2.1. Nodos de la red de acceso**

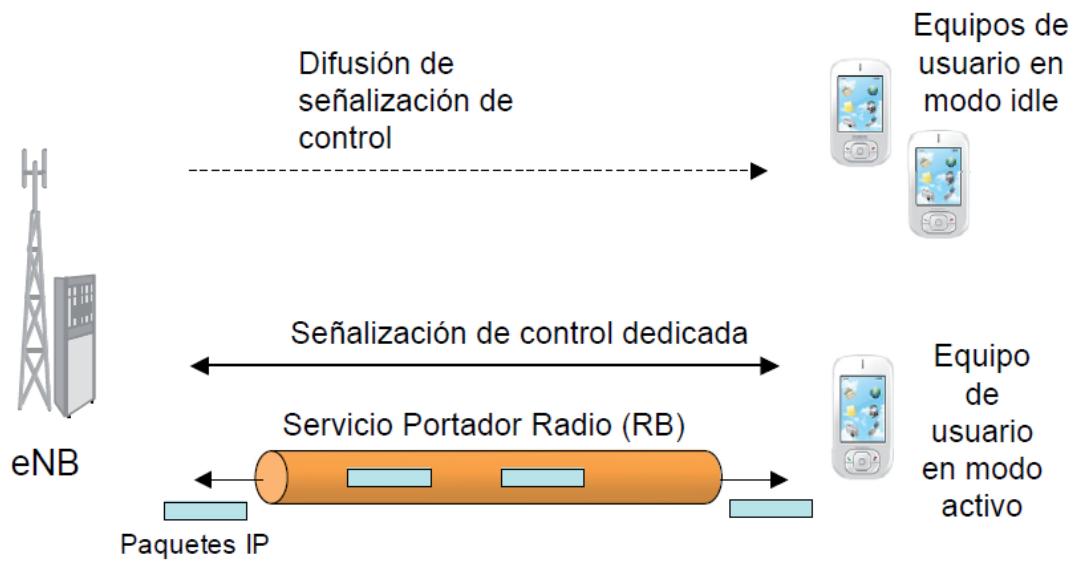
Tal como se ha comentado en la descripción general de la arquitectura red, los nodos de la RAN integran todas las funciones de la red de acceso. Por ello, en el nodos terminan todos los protocolos específicos de la interfaz radio. Mediante dichos protocolos, se realiza la transmisión de los paquetes hacia/desde los equipos de usuario junto con los mensajes de señalización necesarios para controlar la operación de la interfaz radio. El servicio de transferencia de paquetes entre un punto de la RAN y un equipo de usuario se denomina formalmente como servicio portador radio Radio Bearer (RB). El nodo mantiene un contexto de cada uno de los equipos de usuario que tiene conectados. En dicho contexto se almacena la información necesaria para mantener los servicios activos (información sobre el estado del equipo de usuario, servicios portadores activos, información de seguridad, capacidades del terminal, etc.) [5].

Sin duda, la funcionalidad clave de un nodo de la RAN consiste en la gestión de los recursos radio. Así, el nodo alberga funciones de control de admisión de los servicios portadores radio, control de movilidad (p.ej, decisión de realizar un handover), asignación dinámica de los recursos radio tanto en el enlace ascendente como descendente (denominadas funciones de scheduling), control de interferencias entre estaciones base, control de la realización y del envío de medidas desde los equipos de usuario que puedan ser útiles en la gestión de recursos, etc.

### **2.3.2.2. Interfaz radio**

La interfaz radio soporta básicamente tres tipos de mecanismos de transferencia de la información en el canal radio: difusión de señalización de control, envío de paquetes y transferencia de señalización de control dedicada entre un equipo de usuario y el punto de acceso a la red. Los tres mecanismos citados se describen a continuación. En la Figura 16 se pueden ver dichos mecanismos:

- Difusión (broadcast) de señalización de control en la zona de cobertura de la celda. La información enviada permite a los equipos de usuario detectar la presencia del nodo y conocer sus parámetros básicos de operación (e.g., potencia máxima que pueden utilizar los equipos de usuario en la celda) así como la identidad de los operadores de red a los que puede accederse a través del nodo. La información difundida corresponde tanto a información específica de la red de acceso (denominada información del Access Stratum (AS)) como de la red troncal (denominada información del Non Access Stratum (NAS)). La difusión de señalización de control también sirve para forzar que un equipo de usuario que no tenga una conexión de control establecida con nodo, inicie un acceso a la red (función de aviso o paging).
- Transferencia de paquetes a los usuarios a través del canal radio. Tal como se ha comentado anteriormente, los servicios de transferencia entre un nodo y un equipo de usuario se denominan servicios portadores radio (RB). Es importante destacar que los servicios portadores radio de E-UTRAN han sido diseñados específicamente para soportar tráfico IP y no permiten la transferencia de otros protocolos (e.g., paquetes X.25, tramas Ethernet, etc., utilizados en 2G y 3G). Por ello, de cara a la optimización del envío de tráfico IP a través de la interfaz radio, los servicios portadores albergan funciones como la compresión de cabeceras de los paquetes IP que permiten reducir el número de bytes enviados por la interfaz radio (las cabeceras de los paquetes IP pertenecientes a un mismo tipo de tráfico contienen un gran número de parámetros idénticos, p.ej, direcciones origen y destino, por lo que no resulta necesario enviar todos los bytes de la cabecera IP en cada uno de los paquetes).
- Transferencia de señalización de control dedicada entre el nodo y un equipo de usuario. El establecimiento de una conexión de control dedicada resulta imprescindible de cara a poder gestionar el uso de los servicios portadores radio así como para realizar cualquier gestión de señalización con la red troncal (e.g., registro del terminal en la red). La conexión de control se soporta mediante el protocolo Frame Relay (FR) (anteriormente SS7) y en las redes LTE mediante Radio Resource Control (RRC). A través de dicho protocolo se gestionan, además del establecimiento, modificación y liberación de los servicios portadores radio entre el nodo y el equipo de usuario, otros mecanismos claves para la gestión eficiente de los recursos radio. Entre dichos mecanismos cabe citar el control y envío de medidas radio desde los terminales hacia el nodo y el mecanismo de handover, que permite que un equipo de usuario cambie de celda manteniendo activos tanto la conexión de control como los posibles servicios portadores radio que esté utilizando. Los terminales que mantienen una conexión de control con la RA se dice que se encuentran en modo conectado o activo, en contraposición al denominado modo idle en que el terminal no tiene una conexión RRC y básicamente se encuentra monitorizando la información de control difundida por la red.



**Figura 16 Ilustración de los mecanismos de transferencia de información en la interfaz radio**

Respecto al envío de paquetes de usuario, cada servicio portador tiene asociado un perfil de QoS que debe satisfacerse mediante la correcta configuración de los protocolos radio así como la adecuada operación de los mecanismos de gestión de recursos radio.

La información enviada por la interfaz radio puede protegerse mediante funciones de cifrado que proporcionen confidencialidad e integridad. El servicio de confidencialidad permite que la información sea enviada de forma que ningún otro equipo que decodifique la señal transmitida por el canal radio sea capaz de conocer la información en claro. El servicio de integridad evita que la información transmitida pueda ser alterada de forma malintencionada en el camino entre un nodo y equipo de usuario (e.g., equipo radio que se ubique en medio de la transmisión).

---

## Capítulo 3

# Software Empleado

---

## 3.1 Software empleado en el despliegue

### 3.1.1 IQlinkXG

iQ·link<sup>XG</sup>, propiedad de la empresa COMSEARCH, es una herramienta de ingeniería y asignación de espectro que soporta el diseño completo de redes de microondas fijas. Es capaz de calcular la disponibilidad de los diferentes radioenlaces como las interferencias que se provocan entre ellos, de manera que así podremos asignar un canal (o frecuencia) en cada enlace que asegure un correcto funcionamiento y transporte de la información.

Ofrece la posibilidad de diseñar redes fijas punto a multipunto, soporte de funcionamiento GSM, UMTS, redes TETRA, diseño de Wireless Local Loop (WLL), y Local Multipoint Distribution Service (LMDS). Soporta la gama completa de bandas de frecuencia, 2 a 60 GHz [13].

En la Figura 17, vemos el menú principal del software IQlinkXG:



Figura 17 Menu principal IQlinkXG

Entre sus características se pueden destacar:

- **Funcionalidad para la adaptación por modulación radio (ADM)**

iQlinkXG ofrece la funcionalidad más completa para apoyar el diseño de enlaces de microondas con modulación adaptativa. Incluyendo:

- Personalización de diseños con análisis de voz/datos.

- Disponibilidad y rendimiento de los cálculos de todas las modulaciones.
- Análisis de interferencias con la capacidad de detectar automáticamente el peor caso entre transmisor y receptor.
- Importación sencilla y flexible de numerosas radios de modulación adaptativa a través de la utilización de un formato de hojas de cálculo estandarizadas.
- Cambio ascendente y descendente de modulación de compensación
- Aplicación de ADM con control automático de potencia de transmisión (ATPC).

- **Módulo de vista de red**

Proporciona una interfaz que permite al usuario representar gráficamente la totalidad o parte de la red de microondas, ofreciendo las siguientes funcionalidades:

- Visualización de factores ambientales: morfología y desnivel de capas, terreno, mapas, edificios, datos vectoriales, imágenes aéreas y otras capas.
- Visualización de los emplazamientos y sus enlaces, incluyendo información de frecuencias, planes de canalización, capacidades y configuraciones.

IQlink dispone de una herramienta que permite identificar las posibles salidas de transmisión alrededor de un cierto nodo. Las posibles salidas serán puntos que anteriormente habremos documentado en la base de datos del programa. El programa realiza un análisis radial alrededor del nodo que deseamos, indicándonos si hay o no LoS teórica alrededor del punto. Asimismo, también realiza un análisis de las reflexiones de Fresnel asociadas a las pérdidas por el espacio libre.

- **Diseño de enlaces y análisis de rutas**

iQlinkXG permite la creación rápida de enlaces Punto a Punto (PtP) o Punto a Multipunto (PMP), ofreciendo un análisis de los elementos necesarios en dicho enlace.

También se puede reducir la reflexión de las ondas y optimizar la altura de las antenas gracias a que se determina la línea de visión directa entre emplazamientos generando un perfil del terreno.

Los resultados del perfil se muestran de forma gráfica y numérica, mostrando la curvatura de la tierra (factor K) y la claridad del enlace (zona de Fresnel). Los factores K y los valores de la zona de Fresnel son especificados por el usuario y se pueden modificar con facilidad.

- **Disponibilidad y evaluación del enlace**

La herramienta IQlink calcula el rendimiento y la disponibilidad del enlace basándose en los siguientes estándares: UIT-R P.530-6, UIT-R P.530-7, UIT-R P.530-8, UIT-R P.530-9, UIT-R P.530-10, UIT-R P.837-3, UIT-R P.837-1, ITU-T G.821, ITU-T G.826 y Crane.



- **Planificación automática de frecuencias (AFP) y análisis de interferencias**

El usuario tiene la posibilidad de realizar la planificación automática de frecuencias estableciendo una serie de criterios de manera que el resultado se ajuste a las necesidades de diseño de la red.

IQlink también incluye un análisis eficiente de interferencias que permite predecir la degradación producida por la interferencia acumulativa de varios enlaces, teniendo en cuenta tanto los sistemas punto a punto como los sistemas punto a multipunto.

- **Diseño funcional punto a multipunto**


El módulo de vista de red ofrece una capa basada en código de colores definido por el usuario que refleja el nivel de señal recibido (RSL) e interferencia (C/I) para los sitios seleccionados en la vista de red.

Son compatibles con el análisis tanto las antenas omnidireccionales como las sectorizadas.

- **Informes**

IQlinkXG ofrece informes personalizados que pueden ser generados mediante la base de datos de Oracle con la herramienta de BI Publisher de Oracle, o también a través de conexiones ODBC a herramientas comunes como Excel y MS Access.

### 3.1.2. Google Earth

 , es una aplicación software similar a un sistema de información geográfica (SIG) que permite visualizar imágenes de cualquier parte del mundo a través de un globo terráqueo virtual y ver imágenes de satélites, mapas en relieve y características 3D. Gracias a este programa informático se pueden explorar numerosos lugares, buscar negocios y sitios de interés e incluso, desplazarte por las indicaciones para llegar a un cierto destino [14].

En el proceso del despliegue, se ha utilizado esta herramienta para definir en capas la arquitectura de red (existente y futura), para realizar perfiles de elevación entre diversos puntos.

Entre las opciones que nos proporciona Google Earth destacamos las siguientes:

- *Explorar la Tierra*: explorar cualquier lugar del mundo, obteniendo información sobre ciudades y sus características geográficas.
- *Explorar el cielo*: observar el cielo y el sistema solar.
- *Simulador de vuelo*: que posibilita efectuar simulaciones de navegación aérea con notable fidelidad.

- *Gestión de Capas*: habilitan distintas 'etiquetas' informativas sobre la superficie de la Tierra. De esta manera se podrán conocer a fondo los lugares que más nos interesen. El contenido del “panel lugares” puede ser creado por cualquier usuario de Google Earth o de KML.

En la Figura 18 se puede ver la zona de nuestro estudio en el software Google Earth:

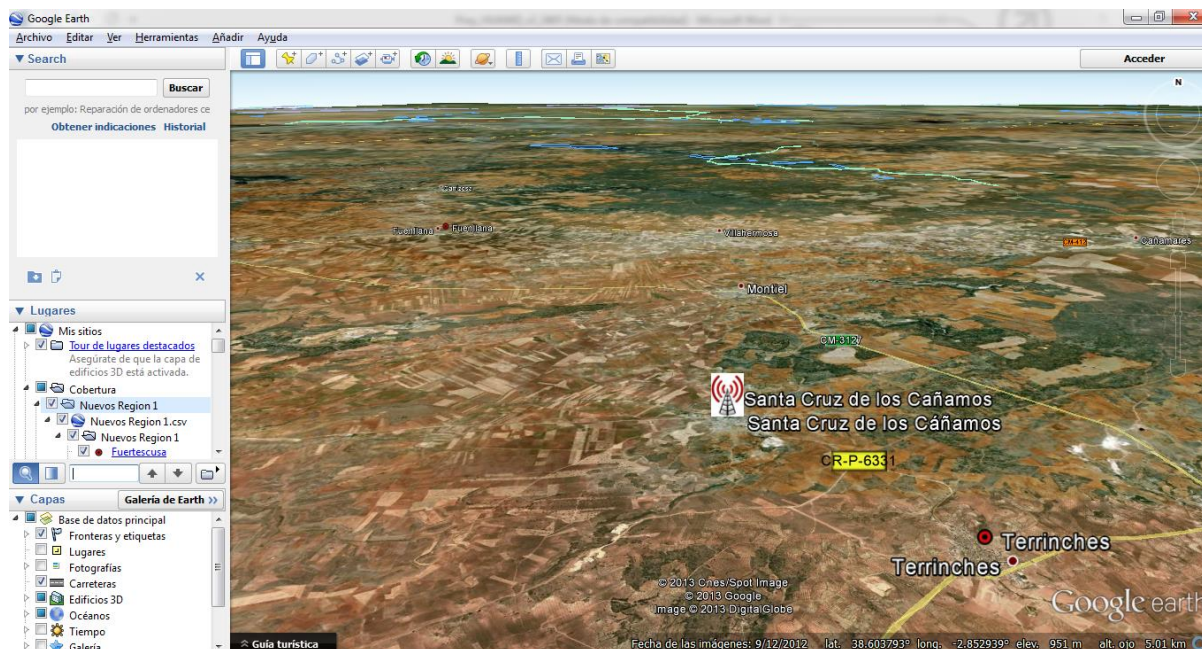


Figura 18 Imagen de la zona de estudio en Google Earth

### 3.1.3. iManager M2000

**iManager™ M2000**  
Mobile Element Management System

es una herramienta desarrollada por Huawei de gestión de red encargado de la operación y el mantenimiento de los elementos de red Huawei CDMA2000 y GSM de una red de comunicaciones móviles.

En el estudio se ha utilizado como herramienta de gestión y monitorización de los elementos “Single RAN” desplegados.

El M2000 iManager permite a los operadores de red implementar bajo una herramienta centralizada toda la red de gestión de la red de comunicaciones móviles de Huawei. Entre sus características se pueden destacar:

- Proporciona una función de trazado de señalización sólida e integrada que puede reducir el coste del equipo de trazado externo.
- Ofrece funciones de O&M (operación y mantenimiento) y de análisis de alarmas, lo cual permite al operador un mejor manejo de la red.

- Facilita en gran medida la confección de informes e indicadores de calidad, generando tablas personalizadas.
- Presenta un alto grado de seguridad, de manera que permite la implementación de tareas de gestión en relación con niveles de autorización de usuarios por medio de la división de red en subredes. Asimismo, el sistema proporciona funciones de recuperación y copias de seguridad de datos con el fin de mejorar la seguridad.

En la siguiente figura vemos el menú principal del software iManager M2000:

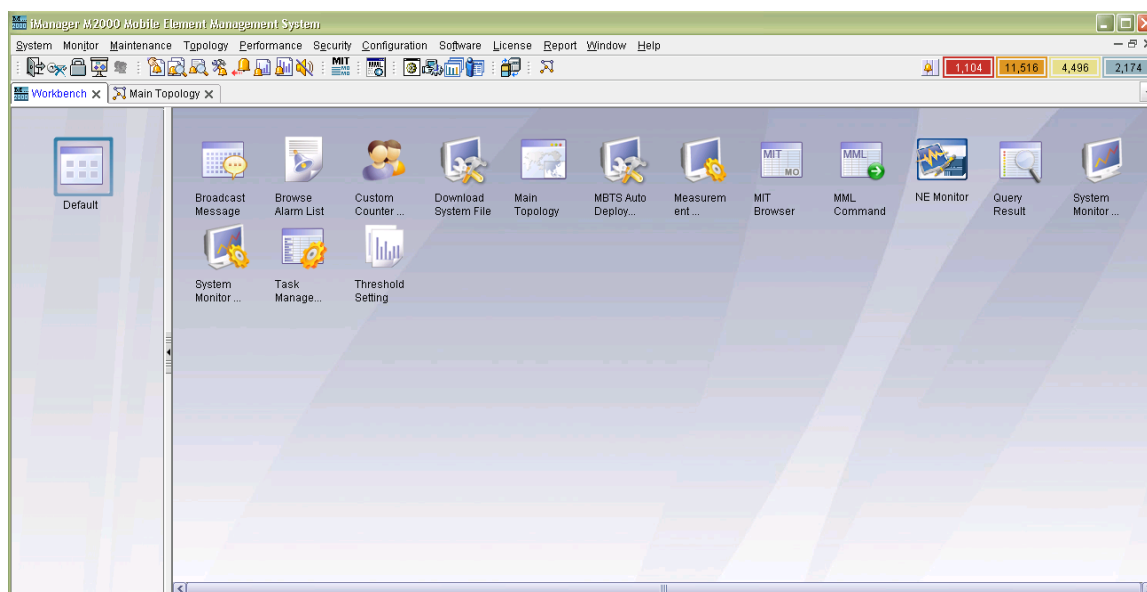



Figura 19 Menú principal iManager M2000

### 3.1.4. MapInfo Professional

 MapInfo Professional, esta aplicación proporciona la creación de mapas por ordenador. Se pueden visualizar los datos como puntos, como regiones por mapas temáticos, o gráficamente, etc. Se pueden llevar a cabo operaciones de zonificación, combinación y división de objetos, y definición de áreas de influencia. También se pueden realizar consultas acerca de los datos y acceder a datos remotos directamente.

MapInfo Professional ofrece la capacidad de procesar bases de datos (incluidas las consultas SQL) y la capacidad visual de creación de mapas y gráficos. Es una herramienta corporativa esencial para el análisis de datos y presentaciones (como en los análisis de datos obtenidos de las medidas del drive test, es decir métodos de medición y evaluación de la cobertura, capacidad y calidad de servicio (QoS) de una red de telefonía móvil).

En la Figura 20, se puede ver el menú principal del software MapInfo Professional:

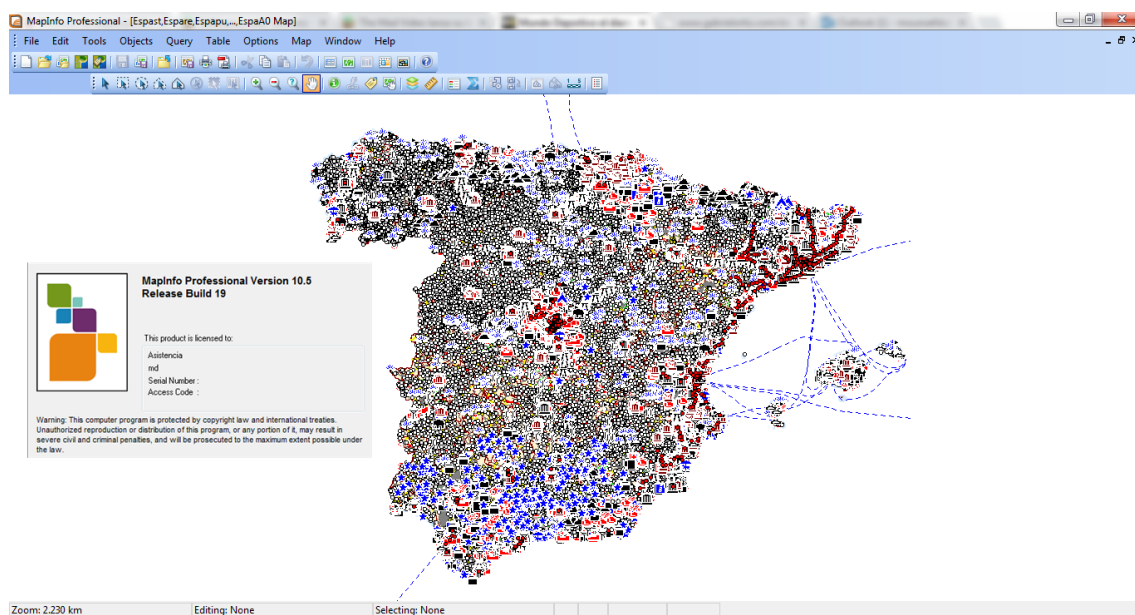


Figura 20 Menu principal MapInfo Professional

---

## Capítulo 4

# Descripción del trabajo realizado

---

## 4.1. Metodología del trabajo

Este capítulo tiene como objetivo desarrollar el proceso que se va a llevar a cabo para la integración de una nueva estación base en una red móvil ya desplegada.

A continuación se presenta la metodología del trabajo llevado a cabo (Figura 21):

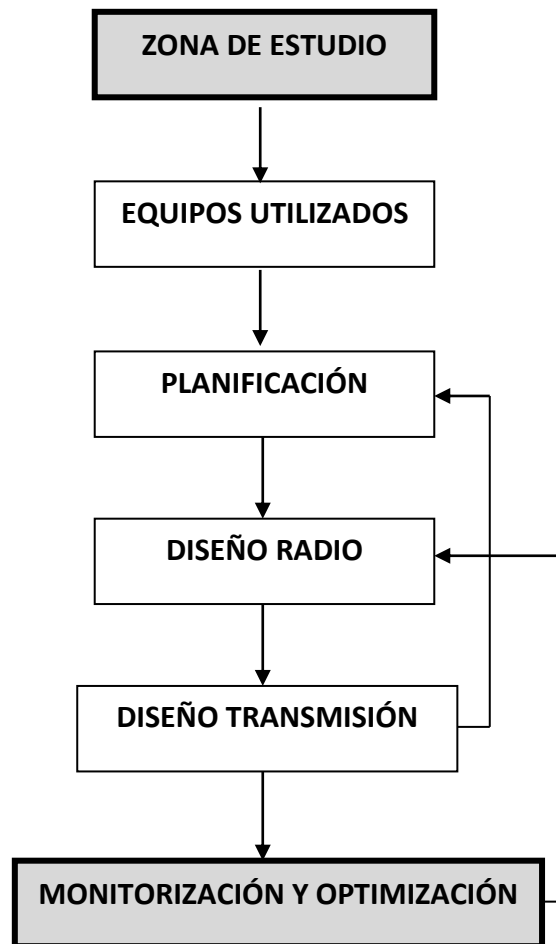


Figura 21 Planificación

## 4.2. Zona de Estudio

El objetivo del siguiente proyecto consiste en mejorar la cobertura y ofrecer comunicaciones de alta velocidad a aquellos clientes que se encuentren en zonas rurales de Castilla La Mancha y que carezcan de emplazamientos de telefonía. En este caso, se ha seleccionado la población de Terrinches, municipio rural de 405<sup>1</sup> habitantes, situada al Sureste de la provincia de Ciudad Real, integrada en pleno Campo de Montiel.

Para el despliegue de una nueva estación de comunicaciones móviles es necesario realizar un análisis detallado de la región, ya que cuando se realiza la simulación en entornos montañosos, se aprecia que cubrir todo lo necesario es bastante complicado, ya que siempre hay alguna irregularidad como una montaña, un cerro, un valle o fuertes pendientes, que puede provocar una pequeña zona de sombra en un punto donde debería haber cobertura. Este hecho hace que se tengan que probar diferentes ubicaciones de la BTS hasta encontrar uno que sea adecuado, o en caso de que no se encuentre ninguno, dar cobertura al punto en cuestión con una nueva BTS.

En las zonas rurales o semirurales donde la densidad de población es muy baja, la principal limitación no es la capacidad de las BTS como en las ciudades, que provoca interferencias altas, ya que las BTS deben estar próximas para dar servicio al alto número de usuarios concentrados en un área pequeña, sino que la limitación son las grandes distancias a cubrir para dar cobertura a un territorio amplio con núcleos urbanos dispersos o carreteras que lo cruzan.

Si el término municipal es más pequeño, o tiene grandes zonas boscosas o montañosas donde no se prevé que haya usuarios, se puede utilizar sólo un sector para dar cobertura al núcleo urbano y a las zonas residenciales, sin olvidar las carreteras. En las carreteras interurbanas o rurales, donde circulan pocos coches y que raramente originan una llamada, basta con dar cobertura, es decir, con la capacidad que aporta una única portadora o TRX, y en estos casos se intentará que la cobertura de la celda del núcleo urbano también cubra la carretera hasta la zona donde otra celda dé cobertura.

En las siguientes figuras se muestran detalles de la zona escogida para el despliegue y de las estaciones móviles cercanas:

---

<sup>1</sup>Fuente: Instituto Nacional de Estadística: <http://www.ies.jccm.es/estadisticas/por-municipio/estadisticas-de-poblacion/padron-municipal/>





Figura 22 Mapa de Castilla La Mancha

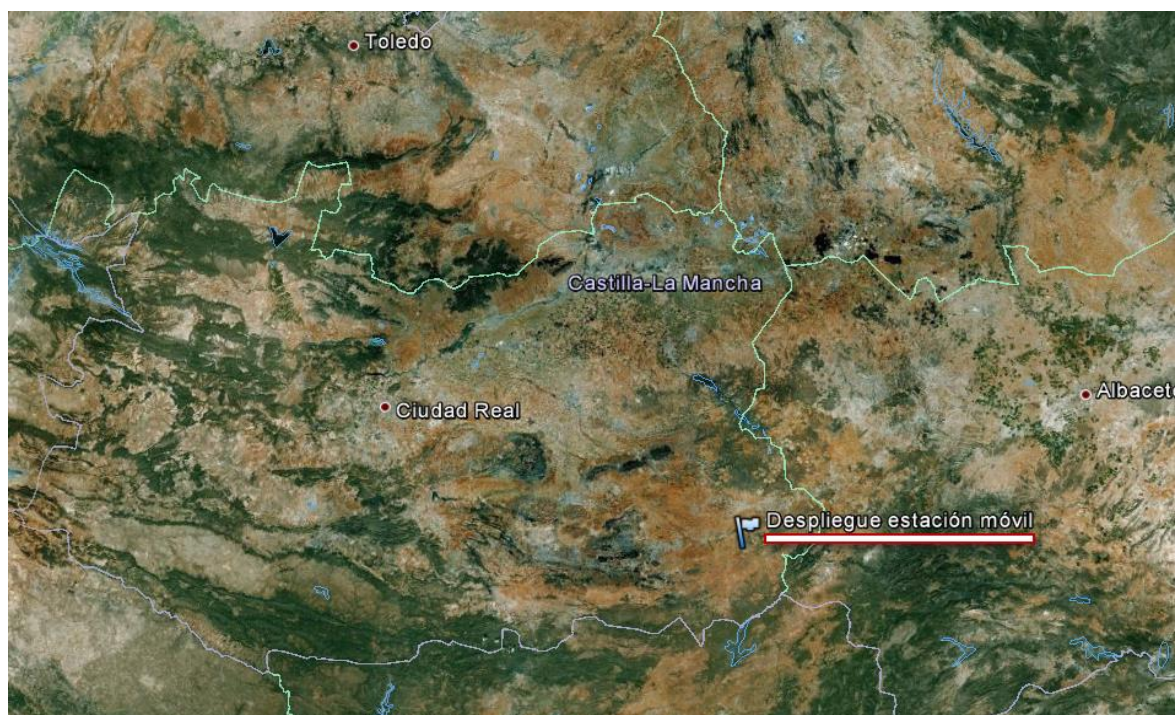


Figura 23 Localización del punto de despliegue de red





Figura 24 Mapa de estación de telefonía móvil en la población de Terrinches

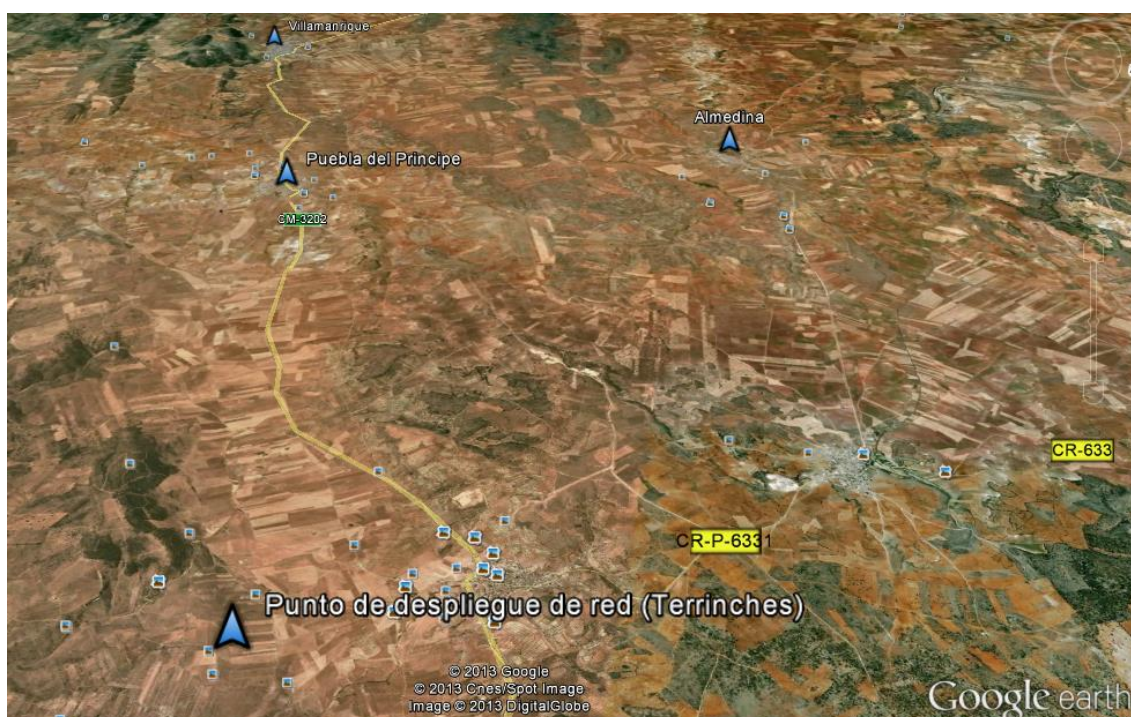


Figura 25 Mapa de estaciones de telefonía móvil cercanas a la población de Terrinches

El tipo de red para el site desplegado será propio o alquilado y estará condicionado por diversos factores. Si las condiciones lo permiten y hay línea de vista directa entre el emplazamiento nuevo y los emplazamientos existentes en la propia red, la salida de transmisión se realizará por la red propia. Por el contrario, si no existe línea de vista entre los emplazamientos se podrá recurrir como solución de transmisión a la contratación de una línea

alquilada a otro operador que permita llevar el tráfico generado en nuestra estación a otro punto de nuestra propia red.

Sin embargo el despliegue de la red propia reducirá el coste anual del alquiler, aunque incrementará la inversión inicial a realizar. Además nos ayudará a controlar la red, por lo que no se dependerá de posibles cortes o remodelaciones de los proveedores en momentos puntuales, que afectan en el servicio a los usuarios.

Un concentrador es un emplazamiento a donde llegan muchos enlaces eléctricos procedentes de las diferentes BTS y se concentran todos en un único enlace, obviamente, de mayor capacidad. Este enlace de mayor capacidad suele ser de fibra óptica. Estos puntos concentradores deben situarse en un punto envolvente de varias BTS para que sea más rentable su instalación, ya que así pueden llegar más enlaces.

### 4.3. Planificación del emplazamiento

Además de la elección de los equipos de radio y de sus parámetros de funcionamiento, los factores más importantes que determinan las prestaciones de un sistema fijo de acceso inalámbrico son la buena situación de las antenas, la correcta planificación del enlace radioeléctrico y la elección de un canal libre de interferencias. Sólo con una buena planificación del enlace entre antenas puede conseguirse evitar las interferencias y los desvanecimientos de la señal, alcanzando una alta disponibilidad en el sistema.

La planificación del enlace radioeléctrico de un sistema de radiocomunicaciones comienza con el cálculo del alcance. Para ello se deben conocer la banda de frecuencias, las características climáticas de la zona y las especificaciones técnicas de los equipos de radio: potencia del transmisor, ganancia de las antenas, sensibilidad del receptor, tasa de error, disponibilidad, etc. Este cálculo del alcance del sistema constituye una primera estimación teórica que deberá verificarse tras la instalación de los equipos. La utilización de aplicaciones informáticas de simulación con cartografías digitales del terreno y de los edificios constituye una potente herramienta de ayuda en la planificación. Valiéndose de las mismas es posible determinar las mejores localizaciones para instalar las antenas y estimar su alcance o cobertura, así como los posibles niveles de interferencia que provienen de otros emplazamientos vecinos, especialmente en el caso de sistemas móviles o de acceso radio punto a multipunto. Posteriormente, las visitas a los posibles emplazamientos permite determinar su aptitud para albergar los equipos de radiocomunicaciones.

Después de haber identificado la zona a cubrir en la que se desea desplegar la estación del estudio, se debe realizar una búsqueda de posibles candidatos que cumplan los requisitos de diseño radio-transmisión.

Los emplazamientos se suelen desplegar normalmente en posiciones dominantes: montes, edificios de gran altura, etc.. y cercanos al municipio con el fin de garantizar una buena cobertura en el área de interés. El estudio previo de visibilidad sirve para conocer teóricamente la visión que tienen dos enlaces de radiocomunicación dentro de la zona a cubrir y comprobar si existe algún medio natural o arquitectónico que interfiera en el enlace. Dado que se trata de un servicio comercial, se tiene que tomar la decisión que más convenga económica y tecnológicamente para tener buen servicio en la zona a cubrir.



En la Figura 26 se identifica claramente la ubicación escogida para la construcción del emplazamiento<sup>1</sup>:



Figura 26 Coordenadas del emplazamiento.

A continuación se presenta el plano catastral de la zona donde se va a ubicar el nuevo emplazamiento (figuras 27 y 28):

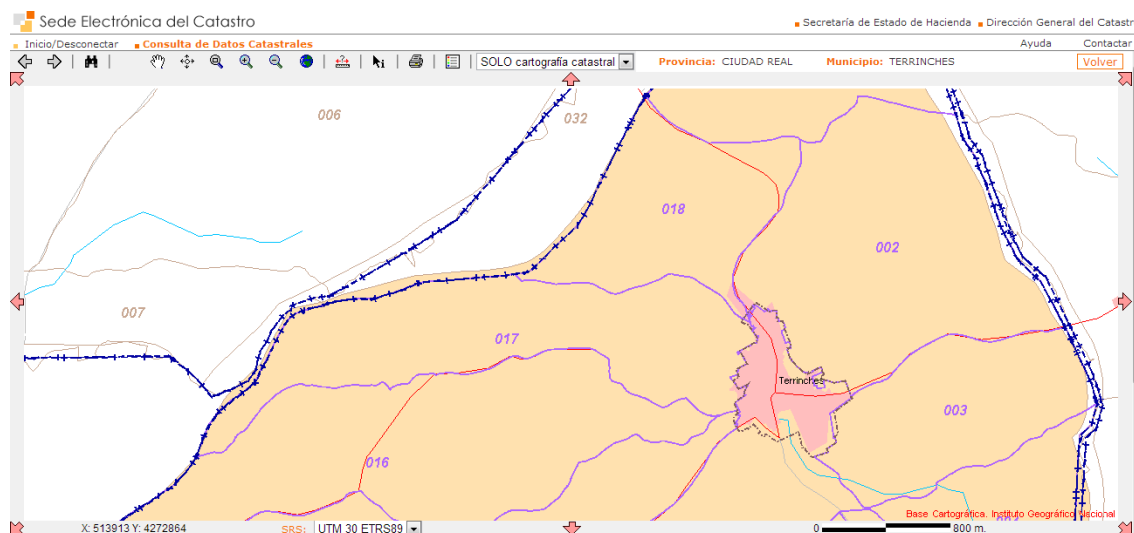
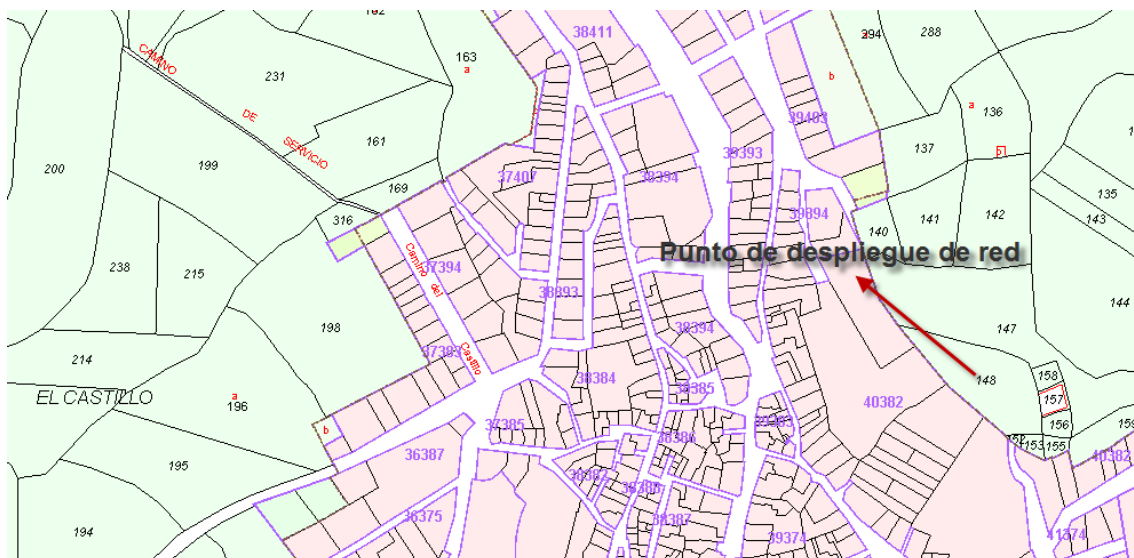


Figura 27 Plano catastral de la zona.

<sup>1</sup>Fuente:Sede electrónica del catastro.



#### 4.4. Equipos y recursos empleados

El uso de un equipo u otro es crítico para el diseño de un radioenlace, ya que la sensibilidad del equipo determina la potencia con la que emitirá el transmisor y de esta manera el cambio del modelo del equipo en uno o los dos extremos implica el rediseño del radioenlace.

En el siguiente apartado se va a describir los elementos necesarios para la implantación de un sistema de comunicaciones móviles con tecnología “Single RAN”. Dichos sistemas se caracterizan por integrar varias tecnologías en una misma infraestructura, esto es, la estación base está preparada para trabajar en GSM, UMTS e incluso LTE al mismo tiempo, y soportar múltiples bandas de frecuencia. Por otra parte, también es importante que los módulos RF GSM, UMTS y LTE estén instalados en el mismo bastidor y ofreciendo un buen diseño. Otro detalle importante es que el control y diseño de los equipos se lleva a cabo mediante software, ofreciendo múltiples ventajas, como pueden ser: el ajuste del equipo y de sus parámetros, tales como la potencia (para que esté configurada en función de la carga de tráfico), activación o desactivación de los equipos, entre otros.

En este estudio, se van a utilizar equipos Huawei de la serie 3900, que constan de los siguientes módulos: BBU3900 Baseband Unit (BBU), RRU3900 Remote Radio Unit (RRU) y MRFU V2 Radio Frequency Unit (MRFU). Para conectar BBU y RRU, se utilizan los puertos CPRI de la tarjeta GTMU, tal como se puede ver en la Figura 29.

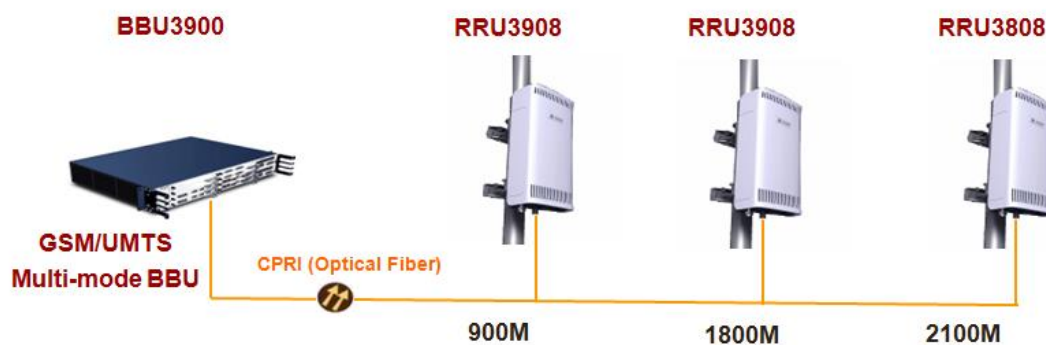


Figura 29 Conexiones BBU 3900.

A continuación se presenta las características más importantes de estos equipos.

#### 4.4.1. Dispositivo de procesado en banda base BBU 3900

La BBU 3900 es la unidad encargada del procesado en banda base de las señales que se transmiten entre la BSC ó RNC y la BTS ó Nodo B [15].

A continuación se presenta las características principales de dicho equipo:

- Dimensiones: 442x310x86.1mm, introducida en un bastidor de 19".
- Peso: 7kg para la configuración estándar (3 sectores con 2 RRUs por sector) y 11kg para la máxima configuración.
- Rango de temperatura: 20 a 55 °C.
- Alimentación: -48V DC desde un disyuntor de 10 A.
- Rango de funcionamiento: -38,8 V DC a -57 V DC.
- Consumo máximo: 250W.
- Protección: IP-20.
- Conexión: por FO con las RRUs.

La unidad de banda base Incluye tarjetas de banda base WBBPb (obligatoria al menos una), y conexión por E1 en los enlaces de transmisión hacia la RNC. Por defecto, se utiliza una tarjeta WMPT con capacidad de 4E1 y Fast Ethernet. Por lo que en total será necesario cablear 4E1 de la tarjeta estándar (más 8E1 de una tarjeta adicional UTRP3(opcional) ).

La BBU 3900, Figura 30, permite las siguientes funciones:

- Procesamiento en banda base.
- Sincronización del reloj del sistema.
- Manejo del procesado de la señal.
- Comunicación para software de gestión y control.

## Multi-Mode BBU – BBU3900

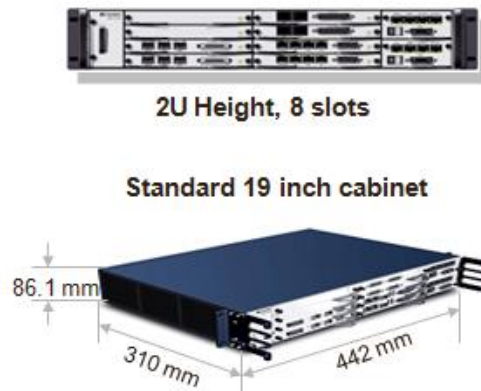


Figura 30 Equipo BBU 3900.

### 4.4.1.1. Módulos de la BBU3900

En la siguiente figura se muestran los slots en los que van colocados cada una de las tarjetas de la BBU3900:

UBFA	Slot 0 WBBP/UTRP/USCU	Slot 4 UTRP	PWR1 UPEU/UEIU
	Slot 1 WBBP/UTRP/USCU	Slot 5 GTMU	PWR2 UPEU
	Slot 2 WBBP/UBRI	Slot 6	
	Slot 3 WBBP	Slot 7 WMPT	

Figura 31 Distribución de slots para las tarjetas del BBU3900

A continuación se presenta una descripción de dichas tarjetas:

- UBFA: es la unidad de ventilación del BBU3900.
- UBRI: es el interfaz radio banda base del BBU3900.
- WBBP: es la unidad de procesamiento en banda base en el modo UMTS.
- UTRP: es la extensión de transmisión para el modo UMTS-
- GTMU : es la unidad fundamental encargada del control y transmisión del BBU3900 en el modo GSM.

- WMPT: es la unidad fundamental de control y transmisión del BBU3900 en el modo UMTS.
- UEIU: monitoriza las señales de control y alarma del BBU3900.
- UPEU: es el módulo de alimentación del BBU3900. Soporta una redundancia de 1+1.

Se puede ver en las siguientes figuras las configuraciones típicas del equipo según la tecnología que se quiera desplegar:

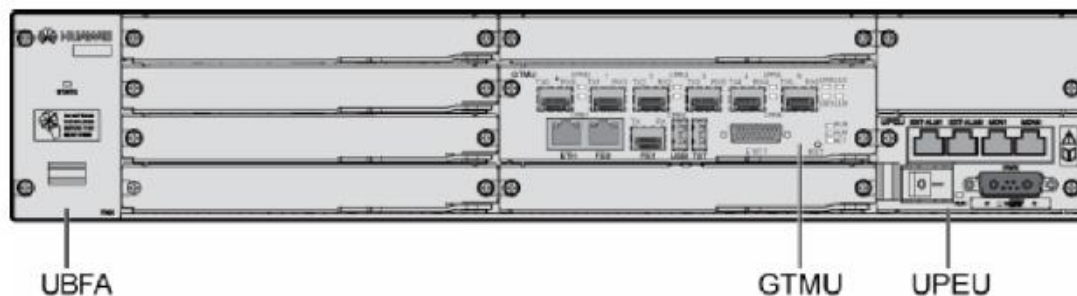


Figura 32 Configuración BBU3900 para GSM

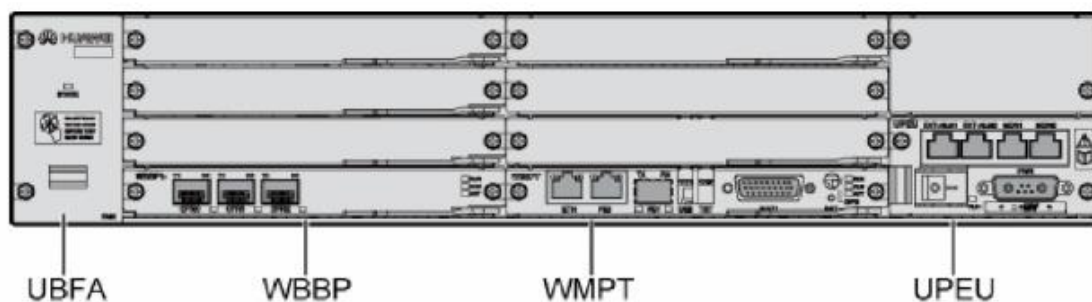


Figura 33 Configuración BBU3900 para UMTS

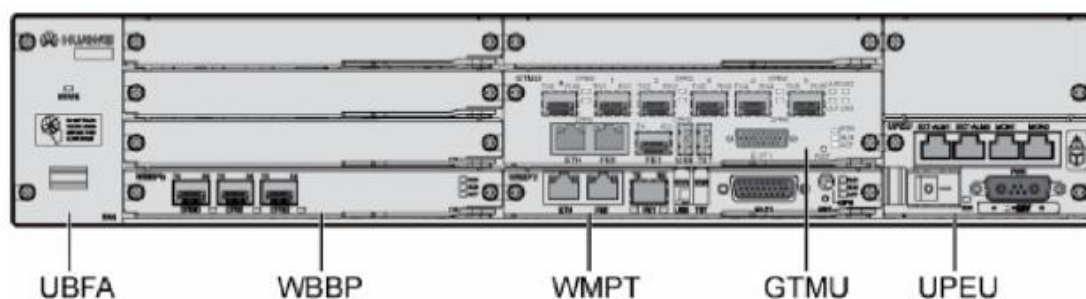


Figura 34 Configuración BBU3900 para GSM+UMTS

#### 4.4.2. Dispositivo de recursos radio RRU 3900

La RRU, Figura 35, es la unidad responsable de la parte de radiofrecuencia y presenta las siguientes funciones [16]:

- Procesamiento de datos.
- Combinación y división de las señales banda base.
- Modulación y demodulación.
- Consumo: 40 W.
- Alimentación: Presenta dos versiones, a  $-48\text{V DC}$  y a  $230\text{V AC}$ .

A continuación se detallan las conexiones necesarias para una RRU:

- Conexión a tierra.
- Alimentación en continua desde un disyuntor de 10 A.
- Conexión de la FO procedente de las BBUs.
- Conexión mediante cable de RF con el sistema radiante (directamente a la antena o a un diplexor).

La instalación tiene 4 posibles configuraciones:

- En un tubo metálico.
- En una pared.
- En un ángulo metálico.
- O en una junta metálica.

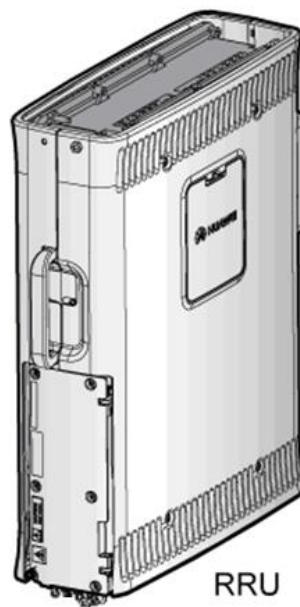
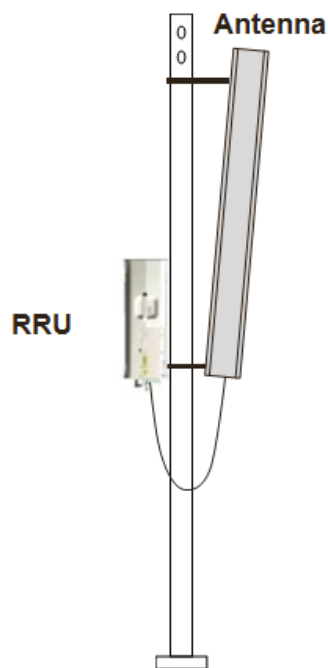


Figura 35 Equipo RRU.







**Figura 37 Antenas radio.**

El acimut de la antena se define como el ángulo formado entre los ejes de la antena y el polo norte. Se deberá definir un acimut conveniente para poder asegurar la calidad del sistema de comunicaciones y evitar interferencias entre las señales.

Las señales entre la antena y la estación base se realiza a través de alimentadores y cables de puente, los cuales transmiten la señal recibida (con la menor pérdida de señal posible) desde la antena hacia el terminal de entrada del receptor o viceversa. Los alimentadores son usados para largas tiradas de cable por su dureza y por la poca pérdida de señal que presentan. Por otra parte, los puentes se utilizan en distancias cortas de conexiones por su maleabilidad.

En este proyecto solamente será necesaria la instalación de una antena, ya que el sistema propuesto se podría configurar tanto en 2G como en 3G.

La frecuencia de trabajo será UMTS y GSM en la banda de 900 con dos antenas cross polar duales de dos sectores. El primer sector tendrá una orientación de  $120^\circ$  que apuntará hacia la localidad de Terrinches y el segundo de  $240^\circ$  con el fin de dar cobertura a la carretera comarcal CM-3202 (Configuración: GSM 330 (3 TRX, 2 sectores) y UMTS900 110 (1 portadora, 2 sectores)). En la siguiente figura se puede ver el diagrama de radiación correspondiente a una antena sectorial de  $120^\circ$ :

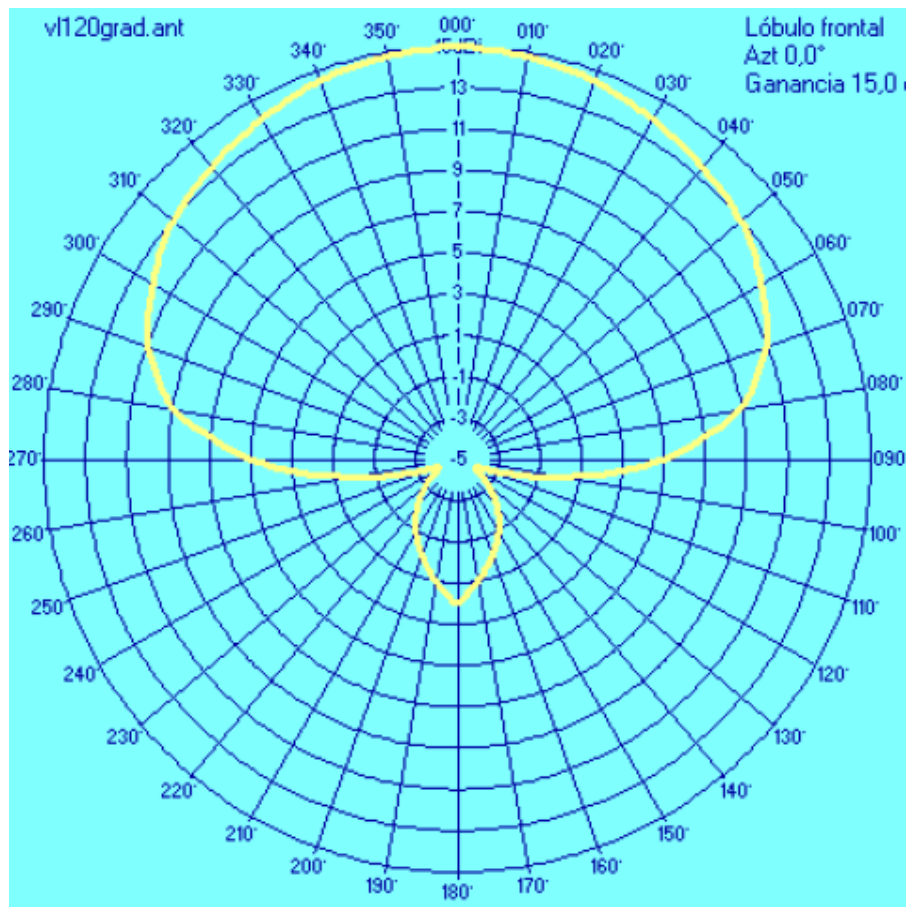


Figura 38 Diagrama de radiación antena sectorial 120°.

Una vez elegida la posición de la nueva infraestructura, habrá que decidir los siguientes aspectos:

- Mástil o torre, teniendo en cuenta el impacto visual.
- Equipos Indoor u Outdoor.

## 4.5. Diseño Radio

### 4.5.1. Replanteo

El replanteo consiste en la visita al futuro emplazamiento que tiene como finalidad definir los criterios a satisfacer. Entre dichos criterios, destacan los siguientes [9]:

- Diseño de celdas de cobertura. Asignación de frecuencias.
- Sistema Radiante a utilizar (cables, tipo de feeder y antenas).

- Bastidores (según capacidad y tecnología). En este caso un APM30 de Huawei que integra GSM y UMTS formado por los equipos BBU3900, RAU y diplexores.
- Análisis de salidas de transmisión: los posibles medios de transmisión más típicos son: microondas, líneas de 2Mbits (E1) o Fibra Óptica. Para el presente proyecto, la salida de transmisión se realiza por radioenlaces de microondas con una configuración 1+0.
- Tipo de obra: rural cubierta o rural intemperie, compartida, tubular, de celosía o de fibra de vidrio. En este proyecto se ha escogido una torre de celosía de 20 m. rural intemperie no mimetizada.

#### 4.5.2. Dimensionamiento

Consiste en la elección del número de portadoras que se deben asignar, para ser capaces de cubrir la zona con una buena calidad de servicio. En función del entorno y el tráfico de la zona, se considera que 2 portadoras serán suficientes.

El dimensionamiento de la red de radio se contempla en varias capas:

- Cobertura: se conjugan factores como el área mínima requerida para obtener una licencia en un concurso nacional con el interés económico dado por la ubicación de los centros potenciales de demanda de tráfico y las zonas de cobertura necesarias para proporcionar un servicio de calidad (continuidad del servicio). Se considera una BTS de cobertura con una capacidad promedio, dada por tres sectores, con 2 TRX cada sector, lo que permitirá ofrecer una capacidad de cursar tráfico de voz de 7,4 erlang por sector (empleando Modelo de Tráfico Erlang B). Un timeslot se emplea como señalización por cada TRX, quedando  $7 \times 2 = 14$  timeslot para tráfico de voz por sector. El empleo de un timeslot para señalización por cada TRX permite optimizar el acceso a la red de radio de parte de los suscriptores.
- Capacidad: son empleadas para potenciar la capacidad de cursar tráfico en los sectores de mayor demanda y de alta concentración de personas como las ciudades. Se considera una BTS de capacidad con una capacidad promedio, dada por tres sectores, con 2 TRX cada sector, lo que permitirá ofrecer una capacidad de cursar tráfico de voz de 7,4 erlang por sector (empleando Modelo de Tráfico Erlang B). Un timeslot se emplea como señalización por cada TRX, quedando  $7 \times 2 = 14$  timeslot para tráfico de voz por sector.
- Calidad: cuya finalidad es potenciar el nivel de señal en la red en zonas no cubiertas u otras zonas afectadas por fenómenos de la propagación, y que correspondan a áreas geográficas grandes que requieran la instalación de una BTS. Se considera una BTS de calidad con una capacidad dada por tres sectores con 2 TRX cada sector, lo que permitirá ofrecer una capacidad de cursar tráfico de voz de 7,4 erlang. Un timeslot se emplea como señalización por cada TRX, quedando  $7 \times 2 = 14$  timeslot para tráfico de voz por sector.
- Microceldas: empleadas en diseños especiales con alta demanda de tráfico o de alta concurrencia como ocurre normalmente en los centros urbanos. Se consideran BTS tipo microcelda con una capacidad dada por un sector con 1 a 4 TRX dependiendo de la demanda de tráfico del sector, lo que permitirá ofrecer una capacidad de cursar

tráfico de voz entre 2,9 erlang y 20,15 erlang, lo que significa entre 7 timeslot y 28 timeslot para cursar tráfico.

En este caso, se han definido dos TRX de capacidad. Con estos criterios, se obtienen 14 timeslot para tráfico de voz por sector.

## 4.6. Diseño Transmisión

El diseño de la transmisión estará determinado por los siguientes elementos:

### 4.6.1. Línea de vista

Además de la elección de los equipos de radio y de sus parámetros de funcionamiento, los factores más importantes que determinan las prestaciones de un sistema fijo de acceso inalámbrico son la buena situación de las antenas, la correcta planificación del enlace radioeléctrico y la elección de un canal libre de interferencias. Sólo con una buena planificación del enlace entre antenas puede conseguirse evitar las interferencias y los desvanecimientos de la señal, alcanzando una alta disponibilidad en el sistema.

La planificación del enlace radioeléctrico de un sistema de radiocomunicaciones comienza con el cálculo del alcance. Para ello se deben conocer la banda de frecuencias, las características climáticas de la zona y las especificaciones técnicas de los equipos de radio: potencia del transmisor, ganancia de las antenas, sensibilidad del receptor, tasa de error, disponibilidad, etc. Este cálculo del alcance del sistema constituye una primera estimación teórica que deberá verificarse tras la instalación de los equipos. La utilización de aplicaciones informáticas de simulación con cartografías digitales del terreno y de los edificios constituye una potente herramienta de ayuda en la planificación. Valiéndose de las mismas es posible determinar las mejores localizaciones para instalar las antenas y estimar su alcance o cobertura, así como los posibles niveles de interferencia que provienen de otros emplazamientos vecinos, especialmente en el caso de sistemas móviles o de acceso radio punto a multipunto. Posteriormente, las visitas a los posibles emplazamientos permite determinar su aptitud para albergar los equipos de radiocomunicaciones.

Se deberá garantizar que existe línea de vista (LoS, Line of Sight), esto es, que hay visibilidad directa entre los elementos origen y destino (parábolas) y un cierto despejamiento (1ª zona de Fresnel) debido a las pérdidas asociadas a la transmisión por espacio abierto.

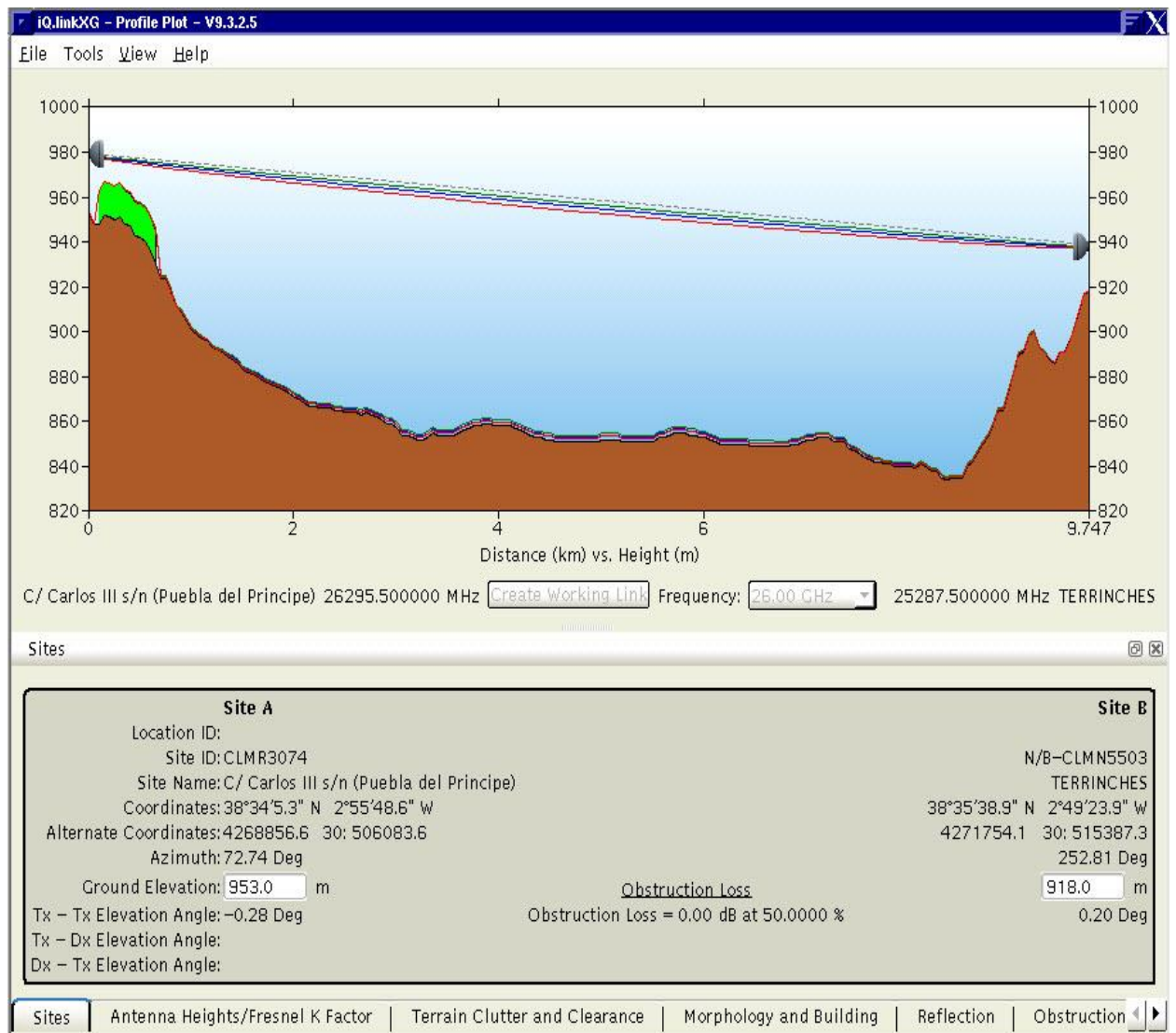
El estudio previo de visibilidad sirve para conocer teóricamente la visión que tienen dos enlaces de radiocomunicación dentro de la zona a cubrir y comprobar si existe algún medio natural o arquitectónico que interfiera en el enlace.

Para comprobar la existencia de visión directa entre las antenas, deben visitarse los emplazamientos donde se tiene previsto instalarlas y realizar una serie de comprobaciones y tareas que se detallan a continuación:

- Determinación de las coordenadas exactas de los extremos del radioenlace (latitud, longitud y altura sobre el terreno) ayudándose de un receptor GPS o smartphone.

- Determinación de la orientación del enlace e indicación sobre un mapa de la zona. Esto ayudará a la localización de posibles obstáculos y elementos significativos sobre el mapa.
- En el caso de enlaces de corto y medio alcance se puede comprobar la existencia de visión directa con ayuda de unos prismáticos. La localización visual del otro extremo del enlace puede realizarse con ayuda de una brújula o valiéndose de alguna marca o elemento significativo del mapa. Se debe tener cuidado con los campos magnéticos generados por los motores de las salas de máquinas de los ascensores de la azotea y que pueden falsear la lectura de la brújula. Si no se consiguiera identificar visualmente el otro edificio donde se va a situar la antena, puede servir de ayuda una segunda persona situada en dicho edificio y que emita algún tipo de destello de luz, con un espejo por ejemplo, en el caso de un día soleado.
- En el caso de falta de visión directa debido a algún tipo de obstáculo, resulta necesario determinar la altura del mástil para evitar la obstrucción. El procedimiento que suele emplearse es similar al anterior, solo que ahora puede utilizarse por ejemplo un globo de helio de color llamativo y sujeto por una cuerda. Una persona situada en el extremo opuesto va elevando el globo hasta que resulte visible a través de los prismáticos.
- Una vez asegurada la visión directa, conviene comprobar que la primera zona de Fresnel se encuentra libre de obstáculos. En este caso conviene prever que el entorno resulta cambiante con el tiempo y con la época del año: construcción de nuevos edificios, árboles que crecen, nieve que se acumula en los tejados en invierno, tráfico aéreo, etc. Adicionalmente, se debe asegurar que no existe ningún obstáculo cerca de la posición de ambas antenas. En especial, superficies metálicas u otras antenas transmisoras dirigidas hacia la nuestra. Resulta interesante documentar todas las comprobaciones por medio de fotografías que puedan ayudar posteriormente.

Lamentablemente, en el caso de radioenlaces de más de unos 8 km resulta difícil realizar este tipo de comprobaciones visualmente, por lo que se debe acudir a otros métodos. La solución consiste en conseguir mapas con perfiles de la zona o utilizar aplicaciones informáticas con mapas digitales del terreno. En este caso, las coordenadas exactas de los extremos del enlace resultan de vital importancia. Se usa una herramienta disponible en IQlink para identificar las posibles salidas de transmisión que se encuentran alrededor de nuestro nodo. Tras comprobar mediante IQlink y Google Earth que no había visión directa posible con Almedina, la posible salida de transmisión que se podía utilizar a través de la red de Orange España (OSP) estaba situado en Puebla del Príncipe. En las figuras siguientes se pueden ver los detalles del perfil de transmisión diseñado:



**Figura 39 Perfil de transmisión del radioenlace del estudio**

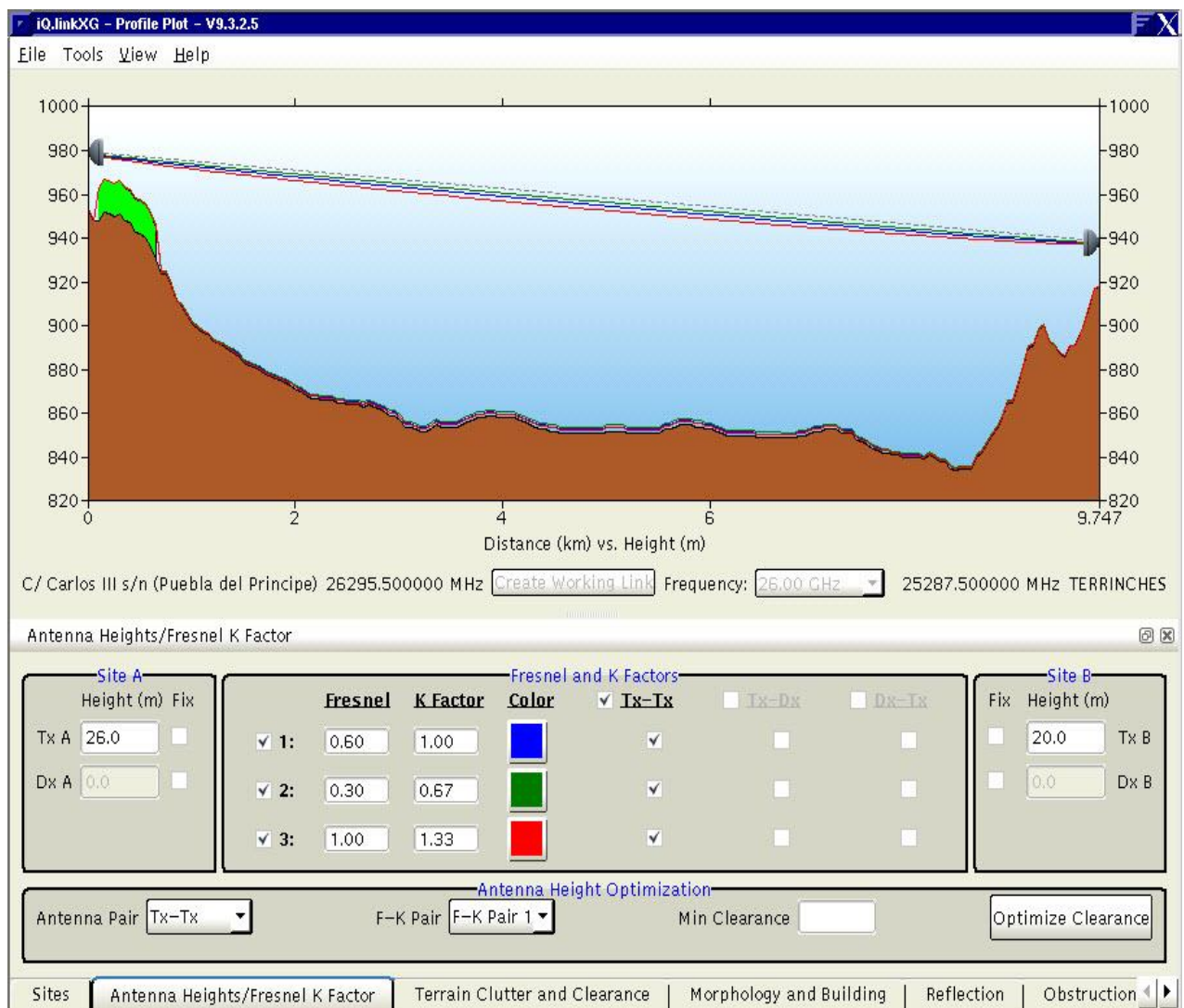


Figura 40 Altura de antenas y zonas de fresnel

Una vez determinado el diseño del radioenlace y la salida de transmisión será necesario definir la ruta de transporte desde el nuevo nodo hasta la BSC o RNC. El nodo del proyecto se ha diseñado asignándole tráfico en E1 y en FE que es enrutado a través de la red del operador ORANGE ESPAÑA (OSP).

#### 4.6.2. Diseño de Radioenlaces

Hoy en día los sistemas inalámbricos están por todas partes. A los ya habituales sistemas de telefonía móvil, se unen las redes de datos inalámbricas, la televisión digital terrestre o los radioenlaces punto a punto. Para el correcto funcionamiento de estos sistemas resulta crucial un diseño adecuado del interfaz radioeléctrico. El diseño de radioenlaces es una disciplina que involucra toda una serie de cuestiones tales como la elección de la banda de frecuencias, el tipo de antenas y los equipos de radiocomunicación, el cálculo del balance de potencias, la estimación de los niveles de ruido e interferencia o el conocimiento de las



distintas modalidades y fenómenos de propagación radioeléctrica, entre otras. Debido a su gran variedad, haremos mención solamente a algunas de estas cuestiones [6].

La red de comunicaciones de un operador móvil puede estar formada por 3 grandes tipos de enlaces:

- PDH
- SDH
- Ethernet (Híbridos, Full Packet)

Este proyecto, se centra más en este último tipo de Radioenlace (RE) debido a que son los que se está empezando a desplegar masivamente en estos momentos y permiten la migración hacia una red backhaul basada en paquetes, lo que implica una correcta definición de los criterios de diseño y dimensionamiento de la red de radioenlaces.

A la hora de realizar el diseño de radioenlaces es necesario cumplir unos criterios de calidad y de indisponibilidad que garantizarán el buen funcionamiento de los equipos de transmisión. El diseño para nuevos enlaces y reingenierías en IQLink se realizará teniendo en cuenta el umbral para un BER  $10^{-6}$ .

#### **4.6.2.1. Características generales**

El desarrollo de la correcta metodología de trabajo, supone identificar claramente las características generales del diseño:

- Tipo de interfaces: E1s, STM-1, FE y GE.
- Uso de RE para transportar tráfico de voz y datos de manera más eficaz a SDH y PDH.
- Dos tipos de RE Ethernet: Híbridos (con dos etapas de modulación: PDH y Ethernet) y Full Packet (con una única etapa de modulación: Ethernet).
- El suministrador seleccionado de RE ha sido Huawei.

#### **1) ETHERNET y acceso PDH/SDH**

Los radioenlaces Ethernet son capaces de transportar tráfico TDM (interfaces E1s y STM-1 canalizado) y transportan de manera más eficiente el tráfico Ethernet (con interfaces FE y GE ). Concretamente, un RE PDH/SDH tiene una capacidad fija e inamovible que obliga a garantizar/reservar una capacidad por él mismo para diferentes servicios. Dichos RE manejan en aire una estructura PDH o SDH.

Los RE Ethernet, están orientados para optimizar el transporte de los diferentes servicios, sobre todo del tráfico Ethernet. Dichos RE manejan en aire una estructura mixta (RE Híbrido: tramas de 2 Mbps y tramas Ethernet) o bien una estructura Ethernet nativa (RE Packet o RE Híbrido sin tramas de 2 Mbps). En la estructura híbrida los servicios de voz pueden ser enviados a través del tráfico garantizado TDM y los servicios de datos pueden ser enviados a través del tráfico en paquetes Ethernet.

El tráfico E1/T1, ATM e IP/Eth se transporta sobre una capa común compartiendo una infraestructura común de transmisión de paquetes, independiente de la naturaleza del tráfico cursado. Manejando todo el tráfico en paquetes en el enlace de microondas se dispone de más flexibilidad, que permite al operador añadir/eliminar enlaces TDM con el tiempo, y migrar

todos a IP en el futuro, eliminando la necesidad de operar en una red TDM paralela a la red de paquetes [9].

## **2) MODULACIÓN ADAPTATIVA**

La Modulación Adaptativa permite tener un vano con una capacidad variable en función de las condiciones atmosféricas y del entorno que rodea a dicho vano, lo que permite incrementar el throughput radio (tasa de descarga radio) ajustando el esquema de modulación a medida que cambien las condiciones climatológicas. Esta capacidad variable es posible al poder usar diferentes etapas de modulación (QPSK-256QAM) sin que se produzca un corte del servicio cuando se conmuta entre ellas.

En condiciones climatológicas adversas, el ancho de banda del radioenlace se reducirá automáticamente, esto implica que los equipos de microondas deberán priorizar servicios de alta disponibilidad (voz) frente a servicios que requieran un mayor esfuerzo (datos).

La modulación adaptativa puede simplificar el dimensionamiento de la red y utilizar eficientemente el espectro radioeléctrico. Se puede implementar AM en aquellos vanos en los que exista tráfico no garantizado (por ejemplo, tráfico 3G: HSDPA, HSUPA, HSPA+, LTE) [6].

### **4.6.2.2. Parámetros de diseño**

A continuación se detallarán los parámetros o variables fundamentales que deben analizarse a la hora de diseñar un radioenlace [13]:

#### **1) BANDAS DE FRECUENCIA**

Para la realización del Proyecto es necesario identificar claramente las bandas de frecuencia que se podrán utilizar. La selección de la banda de frecuencias más adecuada dependerá de:

- Longitud del vano y zona en la que se va a instalar.
- Configuración (1+0 o 1+1).
- Disponibilidad y calidad del enlace.
- Capacidad del radioenlace deseada.

Orange ES tiene concedidos varios canales de frecuencia en las bandas 38 GHz, 26 GHz y 23 GHz. Se puede ver la canalización en dichas bandas en las figuras siguientes:

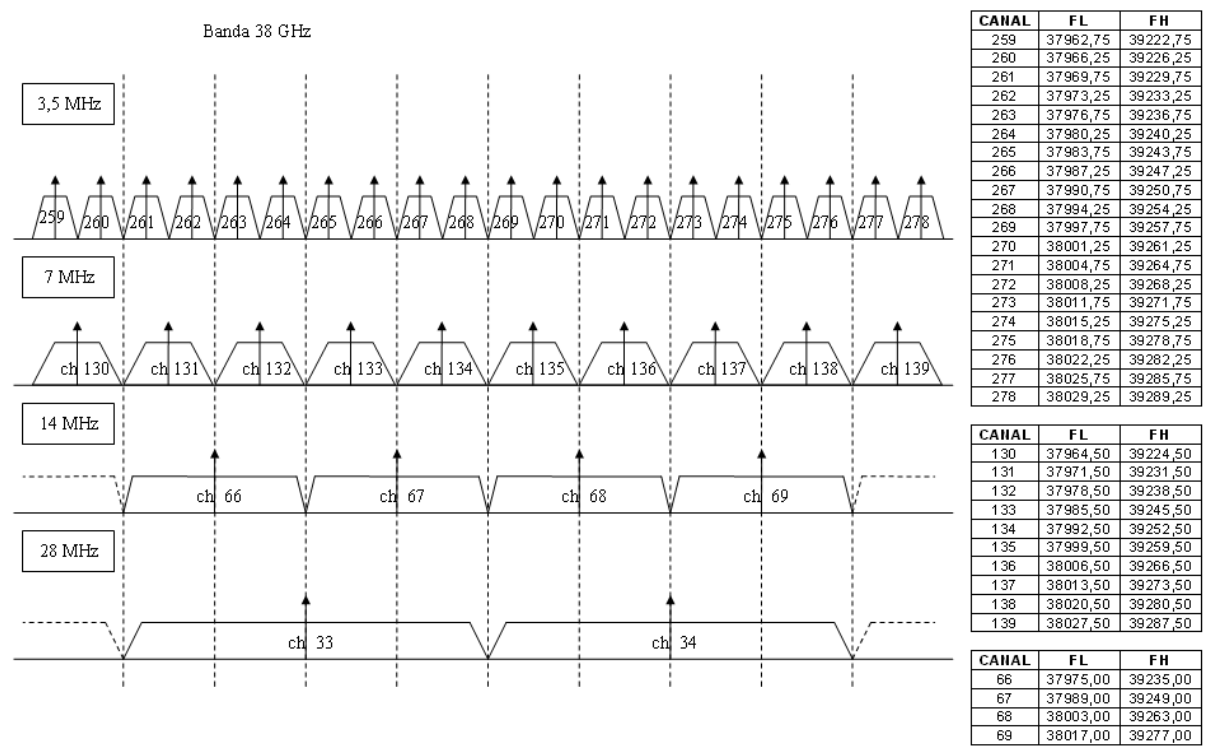


Figura 41 Canalización en la banda de 38 GHz

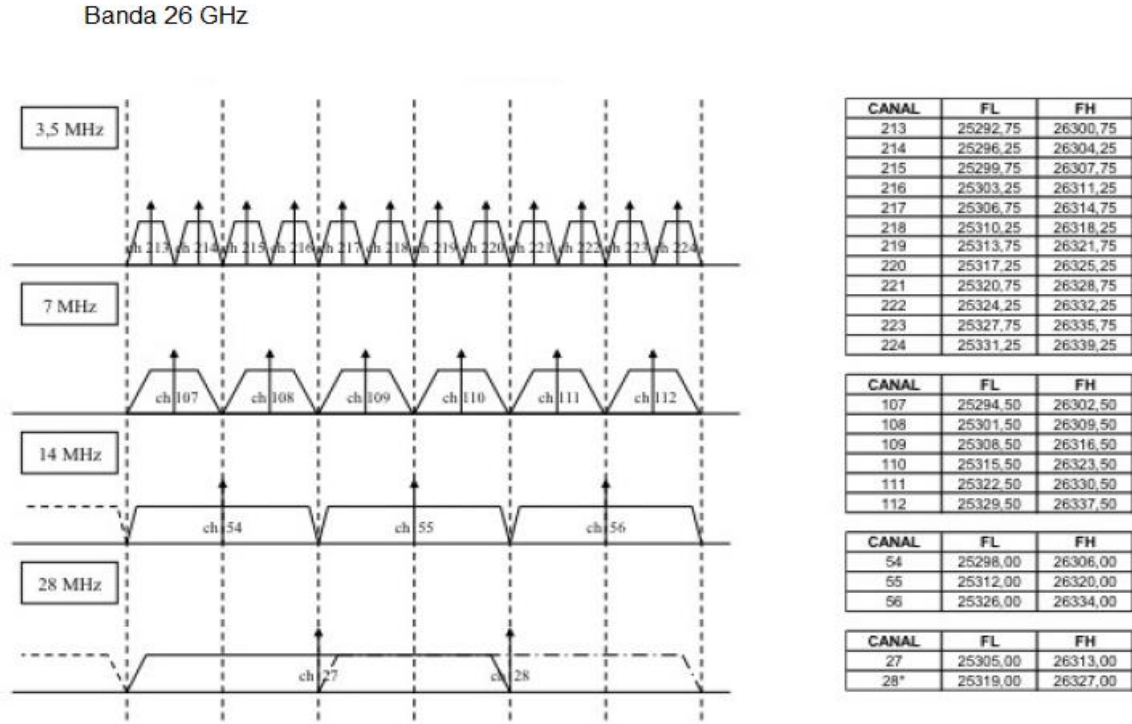


Figura 42 Canalización en la banda de 26 GHz

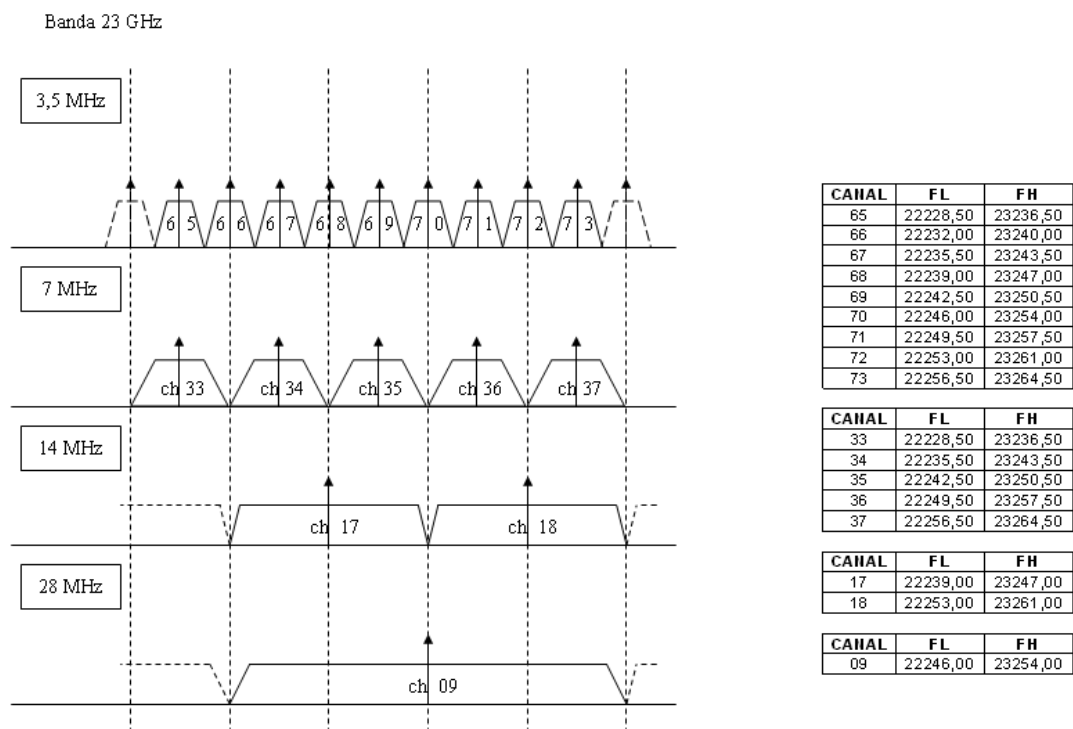


Figura 43 Canalización en la banda de 23 GHz

El espectro es un bien escaso y limitado, por lo cual siempre se recomienda empezar un diseño de un radioenlace por la frecuencia y el ancho de banda espectral más bajos de manera que cumplan los criterios de disponibilidad y calidad.

## 2) DESPEJAMIENTO DEL VANO

Para que un radioenlace en las frecuencias de nuestro diseño pueda ser viable es necesario realizar previamente un estudio de viabilidad o de influencia de obstáculos.

Este análisis se realiza mediante los elipsoides de Fresnel (Figura 44), considerándose que la propagación se efectúa en condiciones de visibilidad directa si no existe ningún obstáculo dentro del primer elipsoide.

A continuación se calcula la zona de Fresnel. Para evitar pérdidas y no alterar el flujo de energía no debería haber obstáculos dentro de esta zona.

$$R_n = \sqrt{n \cdot \frac{3 \cdot 10^5}{F} \cdot \frac{D_1 \cdot D_2}{D_1 + D_2}} \quad (4.1)$$

Donde:

- $R_n$ : radio de la zona de Fresnel.
- $D_1$ : distancia entre emisor y receptor (en kilómetros).
- $D_2$ : distancia entre emisor y posible obstáculo (en kilómetros).
- $F$ : frecuencia (en MHz).

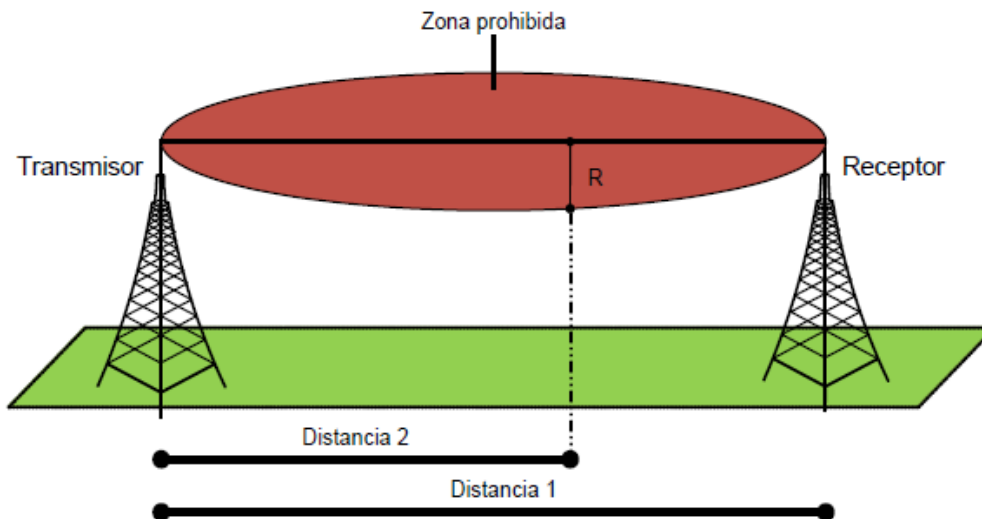


Figura 44 Representación de la zona de Fresnel

Cuando el rayo pasa cerca de un obstáculo o es interceptado por éste, experimenta una pérdida debida a la difracción. Se llama despejamiento a la distancia  $h$  entre el rayo y el obstáculo.

### 3) CAPACIDAD DEL ENLACE

La capacidad del enlace vendrá dada por la combinación de diversos equipos de distintos fabricantes y la homologación para su uso.

Orange España (OSP) tiene homologados equipos que van desde los 2x2, 4x2, 8x2, 16x2, 22x2, 32x2, 35x2, 46x2, 75x2 Mbps, en PDH y en SDH, tiene homologados equipos de capacidades 1 x STM1 y 2 x STM1.

Así mismo, existen algunos vanos SRT de Nokia Siemens Networks (NSN) cuyas capacidades llegan hasta  $2 \times (N+1)$  STM-1, con  $N < 8$  (lo que equivale a 8 x STM-1 AP ó 16xSTM- 1 CC).

### 4) POLARIZACIÓN (HORIZONTAL O VERTICAL)

Como regla general es recomendable empezar el diseño usando un enlace en polarización horizontal y ver si cumple los objetivos de disponibilidad requeridos. Esto es debido a que la polarización horizontal tiene mejores condiciones de propagación ante lluvia, lo cual redunda en una mejor disponibilidad.

## 5) CONFIGURACIONES DE PROTECCIÓN

La consecución de los objetivos de calidad y disponibilidad implica la adopción de medidas protectoras de los radioenlaces contra interrupciones producidas por fallos y averías en los equipos y por desvanecimientos profundos. La protección se realiza mediante sistemas de redundancia.

Los métodos de protección pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Conmutación de protección, o protección hardware, aplicable en el caso de fallos y averías de los equipos. En este caso los radioenlaces se pueden instalar en configuración 1+0 (sin protección a nivel HW) o como 1+1 (con protección a nivel HW). Dentro de la configuración 1+1 se podrá elegir entre un montaje totalmente duplicado o bien con instalación de splitters. La elección dependerá de factores tales como carga en la estructura a montar las parábolas, temas contractuales con la propiedad del emplazamiento, etc.

- Diversidad, empleada para contrarrestar los efectos adversos del desvanecimiento multitrayecto. Consiste en la transmisión de la misma información por dos trayectorias radioeléctricas diferentes, para que de esta forma se vean afectados de forma independiente por el desvanecimiento. En recepción se tendrán dos señales con escasa correlación mútua y que deberán procesarse para generar una única señal.

Una de las técnicas de diversidad es la diversidad en espacio, que consiste básicamente en instalar en el lado de recepción una antena adicional, con una separación de alturas determinada con respecto a la otra antena del vano, y que sirve para cancelar el efecto de las reflexiones multitrayecto. La otra técnica es la diversidad en frecuencia, que consiste en transmitir la misma información simultáneamente por dos frecuencias distintas; en la recepción, el receptor minimiza los efectos del desvanecimiento utilizando en cada instante la frecuencia que va teniendo la mayor intensidad de señal.

En este proyecto, se usará principalmente la primera técnica que será normalmente del tipo 1+0, ya que el nodo a desplegar será un *última milla*. Si el nodo a desplegar hubiese sido un vano SDH de larga distancia o troncal, se hubiese usado la del tipo n+1.

## 6) ANTENAS y PARÁBOLAS

Se dispone de antenas y parábolas de distintos fabricantes y con diámetros diferentes en función de la banda de frecuencias. La elección vendrá determinada tanto por parámetros de diseño y de disponibilidad del enlace, como de posibilidades de montaje en los emplazamientos.

La ganancia proporcionada por la antena esta relacionada con su tamaño de la siguiente forma:

- A mayor diámetro → mayor ganancia y, por tanto, mayor Potencia Isótropa Radiada Equivalente (PIRE) y alcance.
- A menor diámetro → haz más directivo, lo cual provoca menos interferencias para una misma PIRE.

La PIRE se calcula conociendo la potencia del emisor y la ganancia de la antena. Se expresa en decibelios de la forma:

$$PIRE = 10 \cdot \log(P_t \times G) \quad (4.2)$$

En este proyecto se han empleado dos parábolas de 0,6 en origen y destino del fabricante Andrew Corporation.

## **7) MARGEN DE FADING (FM)**

Se define el Margen de Desvanecimiento o Fading como la diferencia en dB's entre el nivel de potencia recibida y el nivel mínimo de potencia que asegura una determinada tasa de error BER (o Potencia Umbral del receptor).

Se debe garantizar siempre para el Margen de desvanecimiento (CFM en IQLink) un valor mínimo de 23dB en PDH y 30dB en SDH (teniendo en cuenta los 2dB de Field Margin en todas las frecuencias, para garantizar este valor incluso en el caso de mayor degradación del umbral permitido por interferencia). El FM puede verse reducido debido a la presencia de obstáculos, interferencias y desvanecimientos.

## **8) INTERFERENCIAS**

Cuando se planifica un radioenlace es importante identificar posibles interferencias que podrían degradar la calidad del sistema. Éstas pueden provenir de otros sistemas ya instalados, tanto terrenales como espaciales, pero también del propio sistema. Y es aquí donde se debe prestar especial atención durante la fase de diseño.

Las interferencias pueden clasificarse en función de su frecuencia y polarización. En el primer caso, se tienen interferencias cocanal (misma frecuencia) y de canal adyacente, mientras que en el segundo caso se tienen interferencias copolares y de polarización cruzada. Las interferencias de canal adyacente pueden atenuarse razonablemente bien con una adecuada canalización frecuencial y mediante el empleo de filtros.

Cuando aparece una señal interferente en el receptor de un radioenlace, el valor en potencia de ésta provocará que la relación señal a ruido del sistema se degrade en un valor que depende de la interferente y, como consecuencia, se degrade el margen de fading.

La discriminación de las antenas tiene una gran importancia a la hora de disminuir los efectos de una interferencia: cuanto mayor es el diámetro de una antena, más selectiva será y, por tanto, mejor será su respuesta frente a señales interferentes. Así mismo, una correcta planificación de frecuencias es fundamental para eliminar o mitigar el efecto de las interferencias. Un factor esencial a considerar en este sentido es la asignación de las bandas H (High, o frecuencia alta de un canal) y L (Low, o frecuencia baja de un canal) de los radioenlaces. En un mismo emplazamiento no se pueden tener bandas H y L mezcladas para una misma banda de frecuencias (o están todos los enlaces de esa banda en H o lo están en L).

## 9) DISPONIBILIDAD

La disponibilidad o fiabilidad de un radioenlace y la calidad del servicio representan el grado en que este sistema de transmisión estará en condiciones de proporcionar el servicio para el que se ha diseñado con la calidad requerida. Para ello se distingue entre dos aspectos: disponibilidad y calidad.

### a. Indisponibilidad Total

La indisponibilidad se describe en términos de interrupciones o de una degradación muy intensa de la señal que, aunque se mantenga la continuidad radioeléctrica, supone, de hecho, un corte del servicio. Se considera indisponibilidad el intervalo de tiempo en el que:

- Aparece una fuerte distorsión de la señal.
- Se produce un corte total o parcial de la señal.
- Aparece un ruido o una BER de valor excesivo.

En radioenlaces digitales el parámetro a tener en cuenta a la hora de obtener información del comportamiento de los mismos es la BER, ésta da una idea de la cantidad de bits errados frente a los bits transmitidos.

Según la recomendación G.826 de la ITU-T, un periodo de tiempo de indisponibilidad comienza con el primero de diez eventos SES (segundos severamente erróneos) consecutivos. Estos diez segundos se consideran parte del tiempo de indisponibilidad. Los periodos de tiempo con errores de duración inferior a 10 segundos no se consideran indisponibilidad, sino periodos de calidad degradada del enlace.

Las interrupciones que dan lugar a indisponibilidad, pueden ser causadas por:

- Averías en los equipos.
- Condiciones anómalas de propagación, principalmente desvanecimientos por lluvia.

#### 1) Indisponibilidad total de un radioenlace:

La Indisponibilidad total de un radioenlace se define como la suma de indisponibilidades Hardware ( $U_{Hw}$ ) y de propagación ( $U_p$ ), es decir:

$$UTotal(\%) = U_p(\%) + U_{Hw}(\%) \quad (4.3)$$

Que en términos de disponibilidad, matemáticamente hablando, se expresa como:

$$A(\%) = 100 - U(\%) \quad (4.4)$$

#### 2) Indisponibilidad total de una cadena de radioenlaces:

La indisponibilidad total de una cadena o tramo completo de radioenlaces se define como la suma de indisponibilidades Hardware ( $U_{Hw}$ ) y de propagación ( $U_p$ ) siendo éstas:



- $U_{Hw}$ : Indisponibilidad del equipo para cada una de las secciones por separado (vanos).
- $U_p$ : Indisponibilidad de propagación. Se calcula por separado para cada vano, combinándose las indisponibilidades parciales generalmente también en forma aditiva.

Se puede aproximar la indisponibilidad total de una cadena de radioenlaces por la suma de las indisponibilidades parciales de cada uno de los radioenlaces que forman la cadena.

## **b. Causas**

- Atenuación debida a las precipitaciones o a otras partículas sólidas presentes en la atmósfera (lluvia, nieve, granizo y niebla). Atenuación debida a las tormentas de arena y polvo.
- Problemas de obstrucción.
- Propagaciones anómalas debidas a la formación de conductos.

La primera representa prácticamente el factor que limita el uso de radioenlaces para frecuencias por encima de los 20 GHz. Para el rango de frecuencias entre 10 GHz y 20 GHz depende de la intensidad de la lluvia; en áreas de fuerte lluvia incluso en la banda de 11 GHz pueden notarse los efectos de las fuertes precipitaciones, mientras que en zonas con una tasa de lluvia inferior, los cortes se deben prácticamente sólo al multitrayecto.

La segunda puede ser eliminada durante el estudio del perfil de terreno y la tercera aparece bajo particulares condiciones climáticas en un número reducido de vanos críticos (muy largos en áreas húmedas, vanos en paralelo con la costa en duras condiciones climáticas, vanos de agua).

## **c. Indisponibilidad HW**

La indisponibilidad debida a los equipos,  $U_{hw}$ , nos da una idea de su fiabilidad. Hay que tener en cuenta dos parámetros en el cálculo de la indisponibilidad hardware: el MTBF y el MTTR.

### **a) MTBF (MEAN TIME BETWEEN FAILURES).**

Este parámetro está relacionado con el tiempo que transcurre entre averías sucesivas del equipo. Al parámetro MTBF se le denomina tiempo medio entre fallos, y constituye una característica de cada equipo y una expresión de su fiabilidad. El valor numérico del MTBF suele ser alto y se expresa en horas. El MTBF lo proporciona el fabricante de los equipos.

### **b) MTTR (MEAN TIME TO REPAIR)**

El Tiempo Medio de Reparación (MTTR) es el valor medio del tiempo que transcurre entre el inicio de una avería y su reparación, y por consiguiente el reestablecimiento del servicio, es decir, el tiempo que se emplea en reparar la avería de un radioenlace (estimación promediada). El valor adoptado para el proyecto del MTTR es de 5 horas.

Este valor será válido para todos los emplazamientos de la red salvo para los llamados “conflictivos” que se corresponderán con emplazamientos que tengan reconocido algún tipo de problema relacionado con el acceso o localización geográfica, que puedan influir en el tiempo de resolución ante una avería y por tanto en el MTTR. Para estos últimos se usará un valor superior al fijado anteriormente que irá en función de las peculiaridades de cada uno de ellos.

#### **4.6.2.3. Objetivos**

Los objetivos que se van a fijar a continuación se han tenido en cuenta para el trayecto completo del enlace, desde el elemento origen hasta el elemento destino, independiente de si es un radioenlace solo o una cadena de ellos. Por tanto, el objetivo de cada radioenlace deberá contribuir a que se cumplan los objetivos finales.

Esta condición va a hacer que se limite el número de saltos posibles en cadenas de radioenlaces. La aceptación de los objetivos de diseño ha sido requisito indispensable para la definición del nuevo enlace a diseñar.

### **1) OBJETIVOS DE DISPONIBILIDAD**

#### **a. END TO END: TRÁFICO GARANTIZADO Y NO GARANTIZADO**

En este apartado se va a distinguir entre el tráfico garantizado (servicios TDM y servicios 3G) y tráfico no garantizado (HSPA+, LTE). En ambos casos, la disponibilidad total del enlace se establece extremo a extremo entre elementos de red:

- Para todas las secciones de enlaces comprendidos entre el elemento a conectar y el punto final de conexión a la red, se fija un valor de disponibilidad total para un circuito (entre un elemento destino y un elemento origen de mayor jerarquía) de tráfico garantizado que será  $\geq 99,9\%$ .
- Para todas las secciones de enlaces comprendidos entre el elemento a conectar y el punto final de conexión a la red, se fija un valor de disponibilidad total para un circuito (entre un elemento destino y un elemento origen de mayor jerarquía) de tráfico NO garantizado que será  $\geq 95\%$ .

#### **b. ENLACES AISLADOS**

Con objeto de cumplir los objetivos marcados en el apartado anterior, el objetivo de disponibilidad que se recomienda cumplir en términos de propagación para un nuevo enlace aislado debe ser el mismo que el aplicado a los enlaces ya establecidos, siendo éste de 99,995% para vanos en configuración 1+0 y de 99,999% para vanos en 1+1 (0,015% y 0,001% respectivamente, hablando en términos de indisponibilidad).

La disponibilidad HW es un valor que es característico de los distintos fabricantes y que se definirá en la BB.DD de IQlink, no siendo por tanto modificable por el diseñador del radioenlace.

## 2) CRITERIOS DE PROTECCIÓN

Los criterios de protección para los radioenlaces (tanto PDH, SDH como Ethernet) vendrán determinados por las siguientes variables:

- Disponibilidad total de los enlaces comprendidos entre el elemento a conectar y el punto final de conexión a la red.
- Criterios de protección de nodos críticos en la red de acceso.

### a. Número de saltos permitidos.

El valor de disponibilidad del 99,9% para tráfico garantizado es para una ruta completa, por lo que es necesario limitar el número de saltos radio para que esos hagan posible que se cumplan totalmente. Como criterio general, a partir de más de 2 saltos los enlaces tendrán que ser 1+1.

### b. Tipo de emplazamientos.

En una red de telecomunicaciones, se distingue fundamentalmente entre emplazamientos de tipo última milla (last mile) y emplazamientos tipo concentrador (hub).

Los emplazamientos última milla son aquellos localizados con una BTS/Nodo B, y del cual no depende ningún otro emplazamiento. Éste es el tipo de emplazamiento a desplegar en el proyecto, un nodo última milla en la localidad de Terrinches.

Los emplazamientos tipo concentrador son aquellos que están recibiendo, al menos, una entrada de TX (mayoritariamente RE) aglutinando éstas a través de uno o varios puntos de salida de TX (FO, RE, LL). Se distinguen la siguiente jerarquía de tipo concentrador:

- 1) CON1: CdC (Centro de Conmutación) donde se encuentran los equipos de Core.
- 2) CON2: Emplazamiento que no sea CON1 y su salida sea con FO.
- 3) CON3: Emplazamientos concentradores de tráfico.

## 3) OBJETIVOS DE CALIDAD

Usaremos los reflejados en las recomendaciones de la ITU-R, F.1491 aplicada a la ITU-T G.826, para fijar los objetivos de calidad. Dentro de la G.826, se definen unos eventos con el fin de caracterizar los errores:

- EB (bloque con errores): Bloque en el cual uno ó más bits tienen errores.
- ES (Segundo con Error): Periodo de 1 segundo con uno ó más bloques con errores ó por lo menos con un defecto.
- SES (Segundo con muchos errores): Período de 1 segundo que contiene  $\geq 30\%$  de bloques con errores (en definición de la G.826) o  $\geq 15$  (en definición de la G.829, y para equipos fabricados a partir del año 2000).
- BBE (Error de bloque de fondo): Bloque con error que no se produce como parte de un SES.

En IQlink, a la hora de realizar los cálculos de calidad, al aplicar la G.826 va a mostrar 2 de estas variables con unos objetivos que habrá que cumplir:

- SES: Objetivo ( %) < 0,016000
- ES: Objetivo ( %) < 0,320000

## 4.7. Monitorización y Optimización

Es el proceso de ajuste de parámetros, cambio de histéresis para handover, depuración de vecindades y balance de potencias de una celda. Las celdas pueden ser las que presenten mal desempeño en las estadísticas, las que hayan tenido cambios en sus antenas o aquellas que causen problemas a otras, especialmente a sus cocanales.

La utilización de este análisis permite identificar los defectos del nuevo emplazamiento y redefinir los criterios que sean necesarios. Para ello, se deben analizar los siguientes aspectos:

- Revisión inicial de la parametrización (first tuning) y control de alarmas del sistema: Una vez que la estación haya sido integrada (instalada y desplegada) se deberá dar la orden de encendido del emplazamiento y la comprobación que la carga de los datos radio generados se ha realizado correctamente en la red. En este caso, la orden de encendido de la estación de Terrinches se produjo el 20 de Mayo de 2013 y desde ese momento se empezó la carga en los sistemas M2000 y en las BBDD de Orange España (OSP) de los datos de tráfico de la estación.
- Análisis de estadísticos: Comprobación de estadísticos del emplazamiento tras su encendido (revisión de KPIs). Mediante el análisis de estadísticos se pueden ver numerosos criterios como el rendimiento de la estación, sus caídas y los datos máximos y mínimos de tráfico.
- Cambio de parámetros hardware y software. Con el fin de mejorar la cobertura y el rendimiento del nuevo emplazamiento.
- Medidas de cobertura (drive test): Las medidas de cobertura se realizan insitu mediante el análisis de Drive Tests. Los Drive Tests son medidas de cobertura realizadas en los alrededores del emplazamiento. Para ello, se utilizan coches con numerosos teléfonos que toman medidas de frecuencia por TRX, Broadcast Control Channel (BCCH) y potencia recibida RXLevel (niveles de cobertura) tanto en 2G como en 3G.

---

## Capítulo 5

# Resultados

---

### 5.1. Resultados obtenidos para la estación del estudio

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para la configuración final que tendrá la estación de estudio del proyecto. Para ello, como se ha visto anteriormente, ha sido necesario identificar claramente los detalles tecnológicos que había que estudiar, aplicados a un caso real, en este caso, la nueva estación de telefonía móvil desplegada en la localidad de Terrinches, provincia de Ciudad Real.

## ANÁLISIS DEL PERFIL DEL VANO

Para el ejemplo del proyecto se analizaron las salidas de transmisión de los siguientes emplazamientos: Almedina y Puebla del Príncipe.

La estación más próxima y con visión directa es la situada en Puebla del Príncipe, por lo que se escogió esta salida de transmisión.

Una vez escogida la salida de transmisión se realizó una visibilidad directa entre los emplazamientos extremos con el fin de optimizar la altura necesaria (la mínima posible) de las antenas en ambos extremos. Como resultado, en Terrinches era necesario colocar la parábola con una altura de 20 metros. En Puebla del Príncipe la antena estaba colocada a una altura de 26 metros.

En la siguiente figura obtenida a partir del diseño de red realizado en MapInfo con las estaciones disponibles en la red de Orange España, se puede ver la ruta que sigue el radioenlace del estudio hasta la RNC situada en Torre de Calatrava:



**Figura 45 Ruta de transporte seguida desde la estación móvil del estudio hasta la RNC**

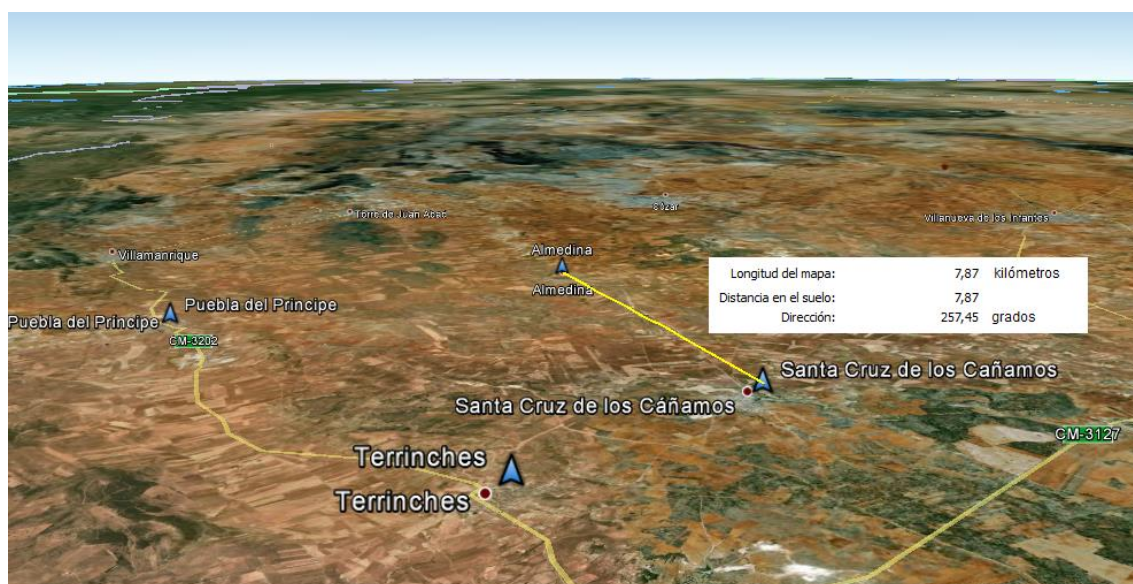
## EQUIPOS, CAPACIDAD Y FRECUENCIAS PARA EL RADIOENLACE DEL ESTUDIO

La banda de frecuencia del radioenlace dependerá de la distancia y capacidad que se le quiera dar al radioenlace. Experimentalmente, se comprobó que la distancia máxima entre origen y destino en función de la polaridad de la antena era (Tabla 3):

Frecuencia	PH	PV
38 GHz	2 Km	6 Km
26 GHz	4 Km	12 Km
23 GHz	7 Km	16 Km

**Tabla 3** Distancia máxima del radioenlace en función de la frecuencia y de la polarización

La polarización depende de la distancia entre los nodos y la frecuencia de trabajo. Por lo tanto se debe emplear en este caso polarización vertical.



**Figura 46** Distancia del radioenlace

Una vez seleccionada la frecuencia más apropiada, que en este caso resultó ser 26 GHz ya que la distancia del enlace era de 7.87 km (figura superior), el siguiente paso fue la selección del equipamiento radio más apropiado en función de la capacidad, suministrador y ancho de banda que se quiere dar al nodo. En este caso, el radioenlace a diseñar fue un emplazamiento Huawei de última milla en el que se tenía una estación 2G (GSM) que coexistirá más adelante con un nodo B.

En cuanto a la capacidad que se quiere garantizar, con 99.95% de disponibilidad end to end es:

$$1 \text{ BTS } (1 \text{ E1}) + \text{HSPA } 7.2 = 2 + 10 = 12 \text{ Mbps} \quad (5.1)$$

Y la capacidad máxima que se necesitará, con 97% de disponibilidad para el tráfico no garantizado end to end es:

$$1 \text{ BTS } (1 \text{ E1}) + \text{HSPA } (15 \text{ Mbps}) = 2 + 15 = 17 \text{ Mbps} \quad (5.2)$$

Una vez que se conocen estos valores, se buscan en la siguiente tabla que relaciona la capacidad con la modulación que se va a necesitar:

BW	MODULACIÓN		
	4QAM	16QAM	32QAM
7 MHz	10	20	25
14 MHz	20	41	51
28 MHz	42	84	105

**Tabla 4** Capacidad RE Huawei

Para el caso de un ancho de banda de 7 MHz, fue necesario utilizar una modulación mínima de 16 QAM que aseguraba una capacidad mínima de 20 Mbps. Al realizar este diseño en IQlink se escogerá también la opción 32 QAM con el fin de conseguir la máxima capacidad del radioenlace.

Cuando pasamos de una modulación a otra, la potencia de salida del radioenlace cambia. Los esquemas de modulación más bajos permiten trabajar con potencias de transmisión más altas, pero se obtienen anchos espectrales más grandes debido a las distorsiones por intermodulación más elevadas creadas por los amplificadores de potencia. Esto implica que los esquemas de modulación más bajos son más interferentes que los esquemas de modulación elevados.

Para este radioenlace la máxima potencia de transmisión según la modulación empleada es la siguiente:

Modulación	Potencia de TX Máxima (en dBm)
QPSK	23
16QAM	20
32QAM	20

**Tabla 5** Máxima potencia de transmisión vs Modulación

Los equipos empleados en el proyecto disponen de la funcionalidad Auto Power Adjust, característica que permite que el vano mediante una cierta atenuación software cambie la potencia de salida a causa de un cambio en la modulación, y que por tanto, el vano sea capaz de ajustar automáticamente la potencia de salida.



## SELECCIÓN DE LA POLARIZACIÓN Y LA CONFIGURACIÓN

En el diseño en IQlink se disponen de las siguientes alternativas para el diseño de los equipos:

- 1+0.
- 1+1 AHSBY, o lo que es lo mismo, 1+1 con splitter asimétrico.
- 1+1 SHSBY, o lo que es lo mismo, 1+1 con splitter simétrico.
- Montaje totalmente duplicado a nivel de antenas.

El enlace del proyecto es un last mille por lo que se diseñó con una configuración de protección 1+0. En el campo Other Losses en IQlink, se pueden añadir las pérdidas adicionales que se consideren necesarias para el diseño de este radioenlace. En el presente proyecto y con el fin de simular el diseño teórico al funcional, se han considerado 3,5 dB's por pérdidas en conectores en ambos extremos del vano

## CÁLCULO DE LA DISPONIBILIDAD Y CALIDAD DEL RADIOENLACE

Debido a que se quiere mantener un valor adecuado del Margen de Fading y evitar la saturación de los equipos, el radioenlace se ha diseñado con un valor de potencia recibida comprendido entre -35 y -50 dB's. Como requisito, el valor seleccionado de Threshold o umbral de recepción para una BER determinado será de  $10^{-6}$ .

Otro aspecto a tener en cuenta es la atenuación que sufrirá el radioenlace por efecto de la lluvia. En IQlink, seleccionando la pestaña de Rain Rate Selection nos aparecen los distintos modelos de lluvia existentes para el cálculo de disponibilidad de radioenlaces. El modelo de lluvia usado en el proyecto sigue la recomendación P.837-1 de la ITU-R, la cual proporciona valores de intensidad de lluvia para diferentes porcentajes de tiempo y zonas hidrometeorológicas.

Además de la indisponibilidad por lluvia hay que tener en cuenta las pérdidas por multitrayecto que sufre el radioenlace. IQlink realiza cálculos de fiabilidad en porcentaje y tiempo de indisponibilidad (en segundos por año) para el fading multitrayecto, que como ya se ha comentado se puede producir en las bandas bajas de frecuencia. El parámetro Geoclimatic Factor es usado para la predicción del multitrayecto y tiene en cuenta la altura de los emplazamientos (en este caso se definió una altura de más de 700 metros), el tipo de terreno (en este caso interior) y variable climática PL (%) que es el porcentaje de tiempo en el que el gradiente de la refractividad N en los 100 m. inferiores de la atmósfera es menor que -100 unidades N/Km. En España el valor máximo para este parámetro está en torno al 30% y se utilizó 30% en IQlink.

El último criterio a fijar fue el tipo de trayecto que iba a identificar al radioenlace. Se distinguen tres tipos de trayectos:

- Trayecto de acceso: incluye las conexiones entre el elemento de red a conectar (BTS o Nodo B) y el correspondiente controlador de Estaciones Base o Nodos B.

- Trayecto de corto alcance: incluye las conexiones entre el controlador de Estaciones Base o Nodos B (DXX, PTN, BSC o RNC) y el centro de conmutación primario (MSC, MGW o SGSN).
- Trayecto de largo alcance: incluye las conexiones entre centros de conmutación primario (MSCs, MGW o SGSNs) o entre estos y otros de mayor jerarquía (Gateway internacional).

En el caso de diseño del proyecto, se usó el criterio de primer criterio (Access en IQlink) y que en este caso se refiere al trayecto entre el elemento de red a conectar (Estaciones Base o Nodos B) y el centro de mayor jerarquía que se encuentre (DXX, PTN, BSC o RNC).

Una vez sentadas las bases, se pueden obtener los resultados en IQlink de disponibilidad y calidad. La definición de los resultados depende de los efectos de propagación involucrados (lluvia y multitrayecto). Los resultados obtenidos de disponibilidad y calidad están referidos a la modulación que se haya escogido como Design Reference en el módulo de selección de las modulaciones.

Los resultados de diseño obtenidos para la frecuencia de referencia con diferentes configuraciones y en distintas bandas de frecuencia pueden comprobarse en la tabla siguiente:

	Tamaño Parábola (diámetro)		
BW	Parábola de 0'3m	Parábola de 0'6m	Parábola de 0'9m
38 GHz	99,9501	99,9776	
26 GHz	99,9922	99,9962	99,9981
23 GHz	99,9926	99,9967	99,9981

**Tabla 6 Resultados de diseño**

En este caso, por ser una configuración 1+0 el objetivo debe ser  $\geq 99,995\%$ . Este objetivo se consiguió tanto en 26 GHz como en 23 GHz. Como la distancia entre nodos era menor de 12 km se escogió finalmente la configuración de diseño en 26 GHz con parábolas de 0.6.

En la siguiente figura se puede ver los niveles de potencia en transmisión y recepción, y comprobamos que el nivel de potencia en transmisión es menor a medida que aumenta el esquema de modulación.

	Modulation	Engineering Reference	Max Tx Power dBm	ATPC Tx @ Upper Rx Trigger dBm	ATPC Tx @ Lower Rx Trigger dBm	RTPC Attenuator dB	RTPC Power Limiter dB	Configured Power dBm	Composite Fade Margin dB
1	16QAM	X	22.00	N/A	N/A	0.00	0.00	22.00	42.17
2	32QAM		22.00	N/A	N/A	0.00	0.00	22.00	34.17
3	64QAM		19.00	N/A	N/A	0.00	N/A	19.00	29.17
4	128QAM		19.00	N/A	N/A	0.00	N/A	19.00	23.67

Figura 47 Resultados de las modulaciones de referencia y adaptativas

## ANÁLISIS DE INTEFERENCIAS

El análisis de interferencias se ha realizado utilizando la herramienta IQlink. A la hora de realizar este análisis, hay una serie de campos a tener en cuenta:

-Search Distance Radius: IQlink tendrá en cuenta la interferencia de los radioenlaces (aquellos que se encuentren grabados como primary) que se encuentran en el radio indicado.

-Search Frequency: Ofrece la posibilidad de que se calculen las interferencias en un rango determinado de canales o, por el contrario, en todos los canales de una banda de frecuencia.

-Polaridad: Realiza el cálculo de interferencias para los canales de una banda de frecuencia determinada y con la polaridad seleccionada.

-Margin: indica la diferencia entre el valor de C/I (relación portadora/interferente, o lo que es lo mismo, la relación entre la señal deseada y la interferente a la entrada del receptor interferido) calculada y el valor de C/I objetivo. El valor recomendado es de 5 dB's.

-Default C/I Obj: Es el objetivo de interferencia a utilizar cuando el sistema encuentra una combinación de señales interferentes y receptoras para los cuales los objetivos no han sido almacenados en la BB.DD. El valor recomendado es 21 dB.

-Calculate OH Loss: Cuando se selecciona esta opción, la atenuación producida por cualquier obstáculo será incluida automáticamente en el cálculo de interferencias.

-Profile K Factor. El factor K ángulo de incidencia (entrada) o reflexión (salida) usado para los perfiles de los trayectos interferentes. El valor utilizado fue  $K = 4/3$ .

-Cumulative Análisis. Esta opción permite calcular la contribución de interferencias dentro de un radio específico y ventana de frecuencia, y como resultado nos muestra la suma de todas esas interferencias para cada canal.

-Antenna Discrimination Mode. En 2 o 3 dimensiones. En este caso, se eligió la opción 2D.

Se puede ver en las figuras siguientes el análisis de interferencias realizado en el despliegue de nuestro estudio:

**General Filters**

Search Radius: 40.0 km Count: 41 of 41 Links

Design Path Polarity:

Assign Existing Polarity First?:

Allow Polarity Change?:

**Channel Selection**

Analyze Channels:

Assign Existing Channels First?:

Partial Band Filter: Min:  Max:

Frequency Window: 56 MHz(+/-)

If more than 1 channel is available, then assign a channel based on the:   Degradation, or

**Adaptive Modulation**

Modulation Scheme:

**PMP**

Exclude Design Carriers:

**Additional Analysis Options**

Cumulative Analysis:

Cumulative OH Threshold: 0.00 dB

Antenna Discrimination Mode:

Use Correlated Criteria:

**IRF Method Parameters**

Single TD Margin: 0.20 dB Cumulative TD Margin: 0.34 dB

Default IRF Value: 0.00 dB

**C/I Method Parameters**

Margin: 5.00 dB Default C/I Obj: 30.00 dB

Cumulative Degradation Limit:  dB

**OH Loss**

Calculate OH Loss:

Profile Start Distance: 0.5 km Profile K Factor: 1.33

**ATPC**

Use ATPC Criteria:

Design Path Power:

Environment Path Power:

Latitude: 38 57 13.01 N  
Longitude: 2 22 -0.28 W

Latitude: 38 12 24.67 N  
Longitude: 3 23 29.97 W

Figura 48 Análisis de interferencias en IQlink (I)

**iQ.linkXG - Interference Analysis - V9.3.2.11**

**Design Path Details**

Site ID / Location ID: <b>CLMR3074 /</b>	<b>N/B-CLMN5503 /</b>
Site Name: <b>C/ Carlos III s/n (Puebla del Principe)</b>	<b>TERRINCHES</b>
Latitude Longitude: 38-34-5.3N 2-55-48.6W	38-35-38.9N 2-49-23.9W
UTM Zone: N E: 30: 4268856.6 506083.6	30: 4271754.1 515387.3
Gnd Elev & Length: 953.00 m 9.75 km	918.00 m
Path Azimuth: 72.74°	252.81°
Radio Model: <b>MINI LINK 26-7</b>	<b>MINI LINK 26-7</b>
Modulation: <b>CQPSK</b>	<b>CQPSK</b>
Capacity / BW: 4x2 Mb/sec / 7 MHz	4x2 Mb/sec / 7 MHz
Power: 18.00 dBm	18.00 dBm
Channel Number: <b>C106</b>	<b>C106</b>
Frequency: <b>26295.5 MHz</b>	<b>25287.5 MHz</b>
Antenna Model: <b>UKY 210 11/SC11</b>	<b>UKY 210 11/SC11</b>
Antenna Height: 26.00 mAGL	20.00 mAGL
Antenna Coordinate: 38-34-5.3N 2-55-48.6W	38-35-38.9N 2-49-23.9W
30: 4268856.6 506083.6	30: 4271754.1 515387.3
Waveguide Loss: 1.30 dB	1.30 dB
Free Space / Abs. Loss: 140.52 dB / 1.15 dB	
Receive Signal Level: -51.27 dBm	-51.27 dBm
Threshold: -82.00 dBm	-82.00 dBm

**Channel Summary**

Include OH Loss: ☒ Yes ☐ No

Channel Number	Number of Cases	Number of Paths	Cumulative into Site A (dBm)	Channel Number	Number of Cases	Number of Paths	Cumulative into Site B (dBm)
1 C106	0	0	-114.18	1 C106	0	0	-119.08

Channel Polarity: **Vertical**      Frequency Assignment: **Paired**

**Figura 49** Análisis de interferencias en IQlink (II)

Finalmente se ha obtenido la siguiente lista de canales disponibles en la banda 26 GHz y las interferencias en cada uno de ellos, que se puede ver en la siguiente tabla:

CANAL	Tipo de Polarización			
	Polarización Horizontal		Polarización Vertical	
	Interferencia en el origen (dB)	Interferencia en el destino (dB)	Interferencia en el origen (dB)	Interferencia en el destino (dB)
108	1.9	1.5	0	0
109	1.4	0.7	0	0
110	0	0	0	0
111	0	0	0	0
112	0	0	0	0

**Tabla 7** Canales e interferencias para el radioenlace del estudio

En este caso se seleccionó el canal 110 con configuración vertical.

## INFORME

Informe del radioenlace diseñado:



# COMSEARCH® iQ.link<sup>XS</sup> - Microwave Engineering Record

Link ID: CLM35

Address: N/A

Status: N-Applied

Frequency Band: 26.00 GHz

Phone: N/A

Report: 1 of 1

Fax: N/A

Date: 05-29-2013

E-mail: N/A

Site ID / Location ID	CLMR30		CLMR55	
Site Name	C/ Carlos III s/n (Puebla del Principe)		TERRINCHES	
Street Name			TERRINCHES POL5 PARC54	
City Name				
Site Owner	RWE		RWE	
Coordinates (Lat,Lon)	38 34 05.3N 2 55 48.6W		38 35 38.9N 2 49 23.9W	
Coordinates (region:Northing,Easting)	30:4268856.6 506083.6		30:4271754.1 515387.3	
Ground Elevation (m)	953.00		0.00	
Radio Model				
Output Power (dBm) / Reference Modulation	20 Mb/s / 16QAM		20 Mb/s / 16QAM	
Channel Spacing (MHz)	7.00 MHz		7.00 MHz	
Capacity (Mbit/s)				
Radio Manufacturer	HUAWEI		HUAWEI	
Frequency Plan: Frequency (MHz)	High: 26295.500000		Low: 25287.500000	
Frequency Plan: Frequency (MHz)	High: 26295.500000		Low: 25287.500000	
Polarization	V		V	
ATPC	TX Power (dBm)	RX Power (dBm)	TX Power (dBm)	RX Power (dBm)
Maximum	N/A	N/A	N/A	N/A
Maximum Trigger	N/A	N/A	N/A	N/A
Minimum Trigger	N/A	N/A	N/A	N/A
ATPC Modulation / Range (dB)	N/A	N/A	N/A	N/A
Antenna Model, $\alpha$ (m)				
Antenna Gain (dBi)	41.00		41.00	
Antenna Above Ground (m)	26.00		20.00	
Antenna Manufacturer	ANDREW CORPORATION		ANDREW CORPORATION	
Azimuth (°)	72.74		252.81	
Diversity Antenna Model, $\alpha$ (m)	N/A		N/A	
Antenna above Ground (m)	N/A		N/A	
Antenna Manufacturer	N/A		N/A	
Component Losses				
Branch Loss Tx/Rx (dB)	Tx:3.50 Rx:3.50		Tx:3.50 Rx:3.50	
Attenuator Common/Tx/Rx (dB)	Co:0.00 Tx:0.00 Rx:0.00		Co:0.00 Tx:0.00 Rx:0.00	
Waveguide #1 Model, Len(m), Loss(dB)	SXK 111 0324/1, 0.65, 1.30		SXK 111 0324/1, 0.65, 1.30	
Waveguide #2 Model, Len(m), Loss(dB)	N/A		N/A	

Figura 50 Resumen del radioenlace diseñado

---

## Capítulo 6

# Monitorización

---

## 6.1. Control de estadísticos y monitorización

Una vez puesta en servicio la nueva estación base de telefonía móvil del proyecto es necesario controlar sus estadísticos de accesibilidad, disponibilidad, caídas y bloqueos, handover's y tráfico de voz y datos cursado, con el fin de comprobar su correcto funcionamiento y optimizar su diseño en caso de que fuese necesario, aplicando las correcciones correctivas que se consideren necesarias y apoyándonos en caso de que sea necesario en las medidas obtenidas a partir del drive test (estas medidas se suelen emplear sobre todo para diseños especiales (sites VIP) y en zonas conflictivas. La BTS desplegada en este proyecto no corresponde a ninguno de estos casos). Para obtener dichos estadísticos de funcionamiento de la BTS, se ha utilizado el software iManager M200 de Huawei.

Las figuras 51 y 52 muestran la accesibilidad en voz y datos (GPRS) desde el 20/05/2013 hasta el 30/05/2013 (fase inicial para el control de la estación móvil). Se comprueba que la BTS desplegada presenta buenos valores de accesibilidad después de haber revisado la parametrización y las alarmas. El pico observado el día 26 corresponde a un reset que se ha realizado para la actualización de parámetros.

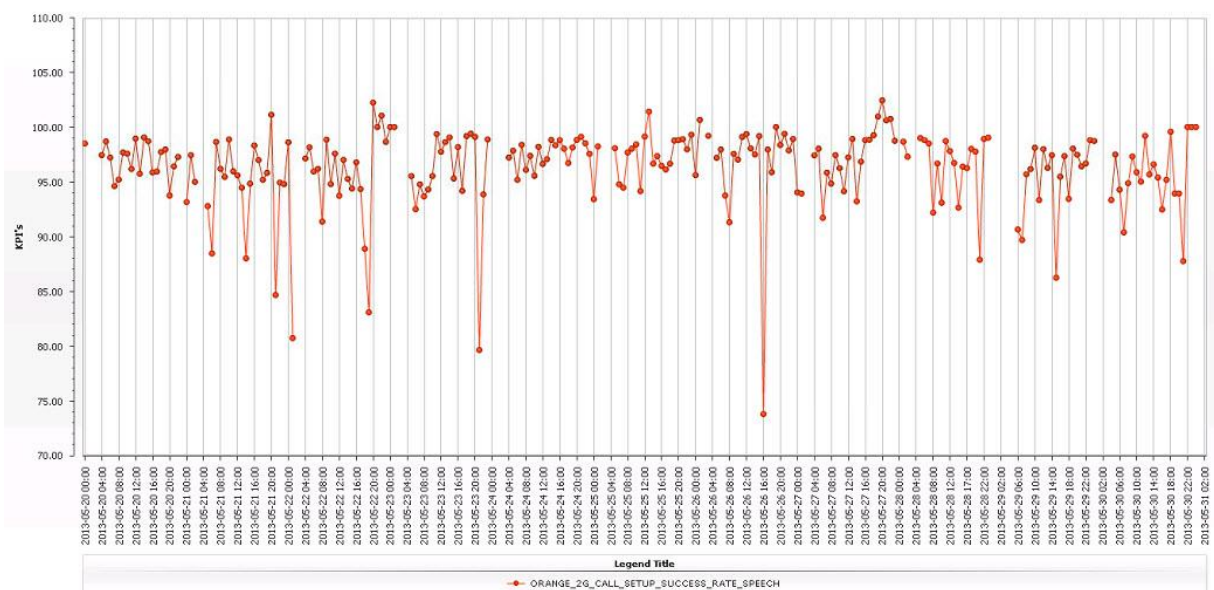


Figura 51 Accesibilidad en voz



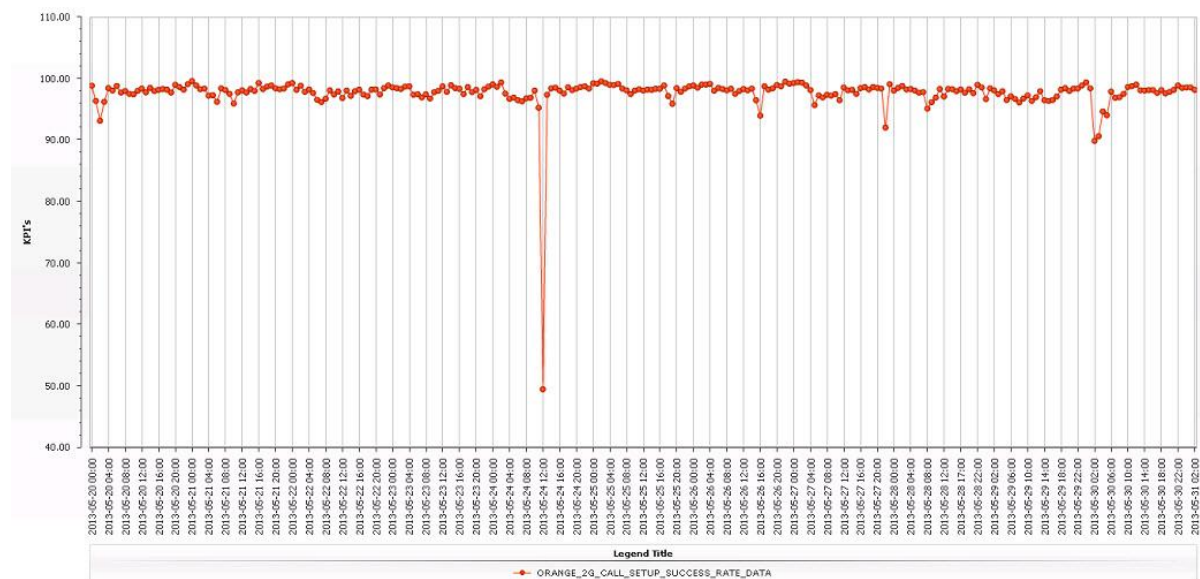


Figura 52 Accesibilidad en datos

La Figura 53 muestra la disponibilidad desde el 20/05/2013 hasta el 30/05/2013. Se comprueba que la BTS desplegada no presenta períodos de indisponibilidad, por lo que la transmisión y el conexionado es correcto. También se ha comprobado que no existiesen alarmas de sincronización.

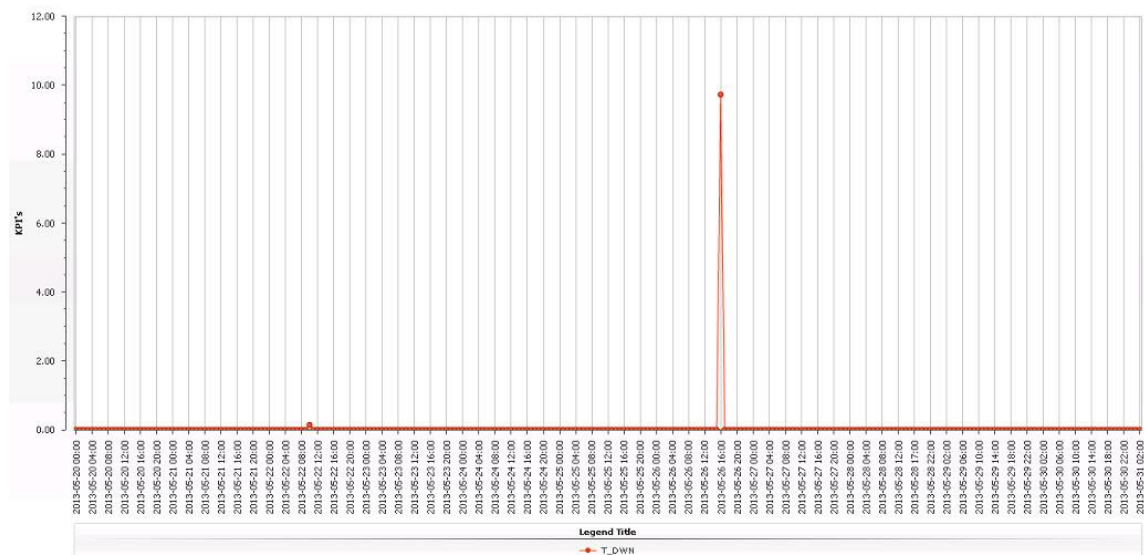


Figura 53 Disponibilidad (downtime)

La Figura 54 muestra las estadísticas de tráfico de voz desde el 20/05/2013 hasta el 30/05/2013, recogiendo los intentos de llamada establecidos y los minutos totales de voz.

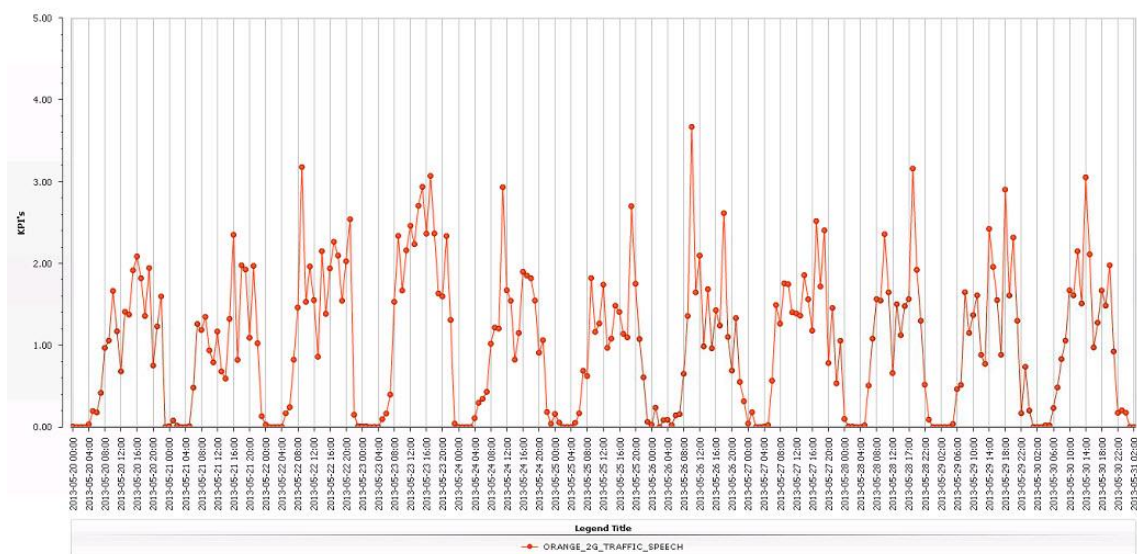


Figura 54 Tráfico de voz

La Figura 55 muestra las estadísticas de tráfico de datos desde el 20/05/2013 hasta el 30/05/2013 en GPRS.

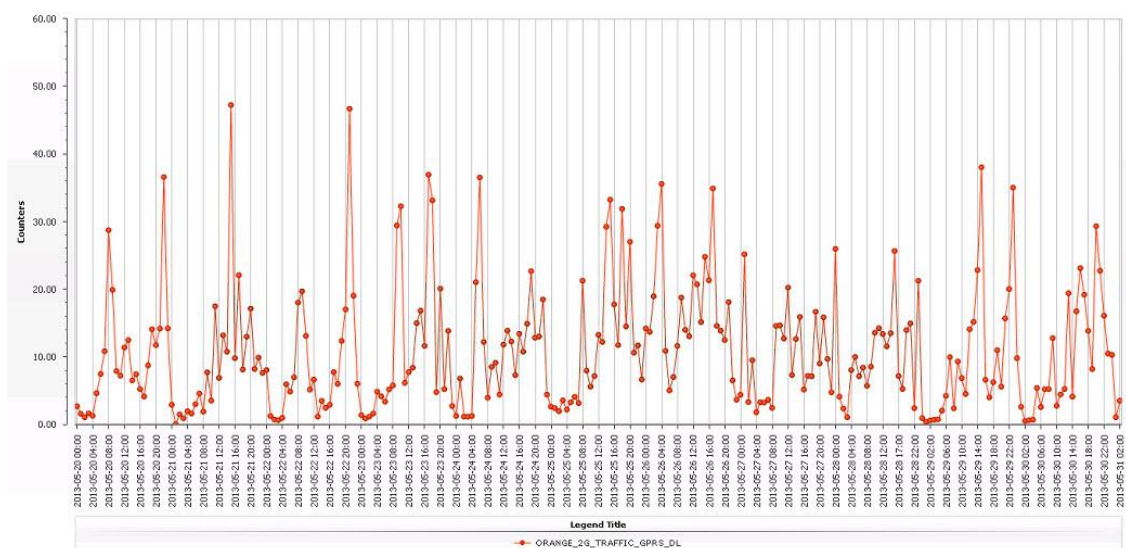


Figura 55 Tráfico de datos

Las Figuras 56 y 57 muestran la tasa de llamadas caídas, desde el 20/05/2013 hasta el 30/05/2013. Se comprueba también que no haya caídas debidas a los handover's, ya que en caso de que se tuviesen este tipo de caídas, sería necesario comprobar el plan de vecinas:

- Definición de vecinas, en caso de que fuera posible.
- Correcta asignación del plan de frecuencias.

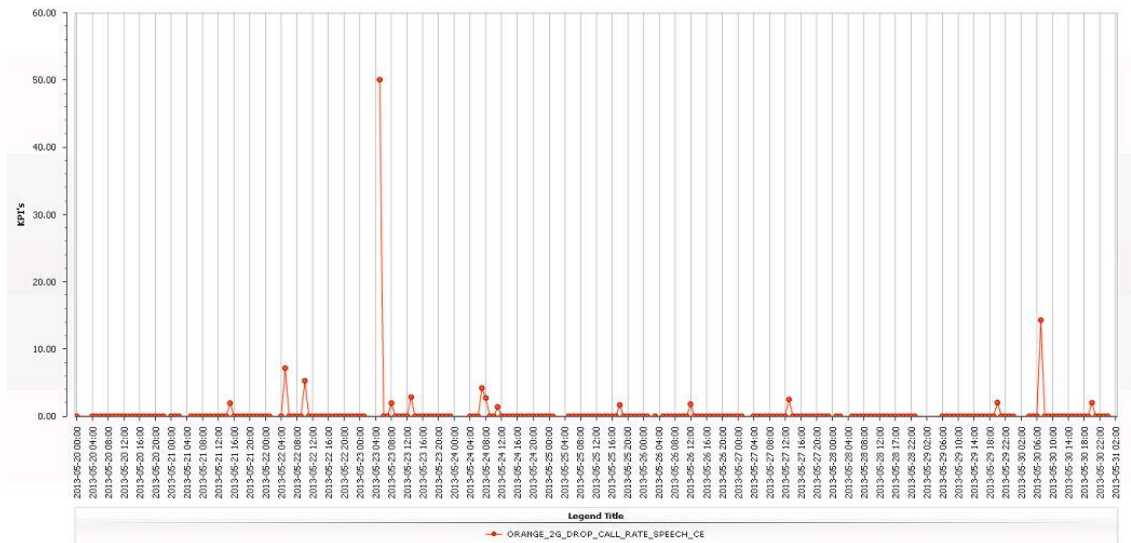


Figura 56 Tasa de llamadas caídas

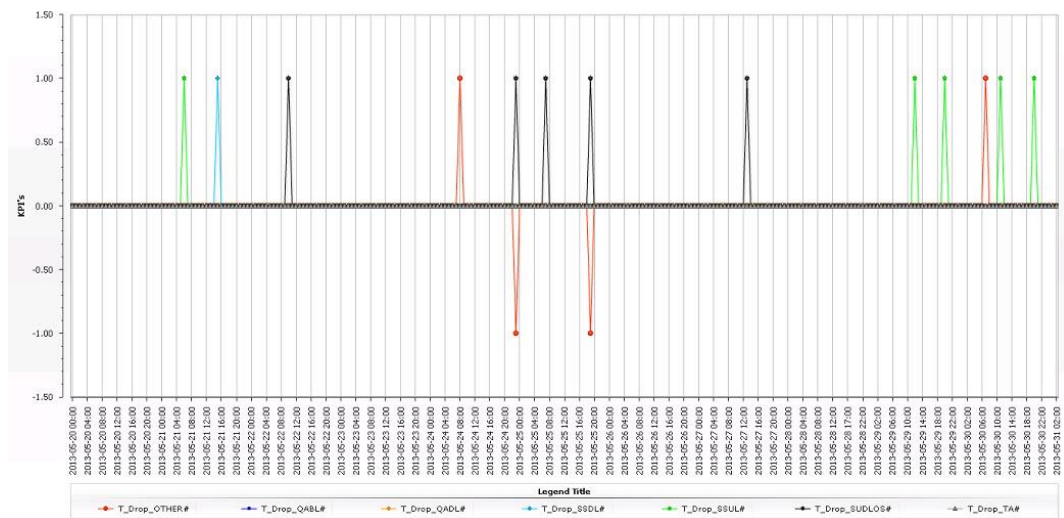


Figura 57 Causas de las llamadas caídas

---

## Capítulo 7

# Presupuesto

---

## 7.1. Presupuesto requerido para el despliegue de la estación base

### INSTALACIÓN ESTACIÓN BASE EN ENTORNO RURAL

	Unidades	Precio unidad	Coste total
BASE STATION EQUIPMENT BBU3900 HUAWEI	1	6034	6034
REMOTE RADIO UNIT RRU3900 HUAWEI	2	813	1626
CONJ. TORNILLERIA LOGIC/NET (20 UNI)	1	12,07	12,07
UNIDAD VENT.TECHO LOGIC A800 F900 2V+T	1	255,44	255,44
PANEL PASACABLES 19" 1U LOGIC	2	15,69	31,38
TORRE TUBULAR AUTOSOPORTADA TRIANGULAR DE 30 MTS	1	2527	2527
INSTALACIÓN ELECTRICA GENERICA	1	1290	1290
PACK BATERÍAS 9120 1000 VA	1	275,89	275,89
ADD TRX GSM	4	380	1520
TARJETA GTMU	1	732	732
DC CABLE (100m) RRU	2	319	638
CABLE (50m) ANDREW	1	319	319
MÓDULO DE ALIMENTACIÓN UPEU	1	346	346
MÓDULO USCU	1	240	240
MÓDULO UBRI BANDA BASE	1	384	384
UNIDAD DE VENTILACIÓN UBFA	1	175	175
DIRECT LINK RRU-01 OPTO CABLE 20m	2	61	122
OPTICAL TRANSCEIVER/TRX	2	37	74
ANETNA CROSS POLAR DUAL	2	500	1000
ANTENA RADIOENLACE ANDREW CORPORATION	1	650	650
<b>TOTAL PARTIDA</b>			<b>18401,78€</b>

Tabla 8 Presupuesto debido a equipos, tarjetas, conectores y herramientas

### PLATAFORMA ELEVADORA

	Unidades	Precio unidad	Coste total
ALQUILER PLATAFORMA ARTICULADA	1	127	127
TRANSPORTE PLATAFORMA ARTICULADA	1	180	180
<b>TOTAL PARTIDA</b>			<b>307€</b>

Tabla 9 Presupuesto plataforma elevadora

## DIRECCIÓN Y CERTIFICACIÓN DE RED

	Unidades	Precio unidad	Coste total
DOCUMENTACION, PLANOS, CERTIFICACIONES, ETC...	1	230	230
DIRECCION DE OBRA	1	2.300,00	2300
ESTUDIO AREA DE COBERTURA	1	34,5	34,5
PROYECTO INGENIERÍA	1	1750	1750
<b>TOTAL PARTIDA</b>			<b>4314,5€</b>

Tabla 10 Presupuesto dirección y certificación de red

## MANTENIMIENTO

	Unidades	Precio unidad	Coste total
MANTENIMIENTO ESTACIÓN BASE 1 AÑO 8X5	1	1187,1	1187,1
<b>TOTAL PARTIDA</b>			<b>1187,1€</b>

Tabla 11 Presupuesto mantenimiento

<b>IMPORTE TOTAL</b>	24210,38€
<b>IVA (18%)</b>	4357,8684€
<b>TOTAL</b>	<b>28568,2484€</b>

Tabla 12 Presupuesto final de la obra

\*La operadora asumirá los costes asociados a:

- Las medidas de seguridad según los reglamentos vigentes de seguridad e higiene y cualquier otra normativa local o autonómica, y en sentido amplio todos los acuerdos o preparaciones necesarias para la ejecución de las obras bajo las mejores circunstancias y en la forma apropiada.
- La gestión y tramitación de las licencias necesarias para el despliegue en el pueblo de Terrinches.

---

## Capítulo 8

# Conclusiones

---

## 8.1. Conclusiones y líneas futuras de trabajo

En este proyecto se ha intentado plasmar tanto los conocimientos teóricos y prácticos obtenidos a lo largo de la carrera como la experiencia laboral recogida durante el periodo de prácticas en una empresa del sector de las telecomunicaciones.

El hecho de haber elegido la provincia de Ciudad Real como estudio del presente proyecto, se debe a las características geográficas y arquitectónicas de la zona que hace posible aplicar las tecnologías mencionadas en el proyecto. El análisis y zona de estudio para el despliegue pone de manifiesto las necesidades en la red existente, que pueden ser debidas a la presencia de una zona sin cobertura, con mala cobertura o sin alguna tecnología. Estas necesidades llevaron al despliegue de un nuevo site en la red existente.

El objetivo principal del proyecto era el despliegue de una nueva estación base de telefonía móvil en una zona rural, aplicando el concepto SDR, el cual permite la renovación de las tecnologías a bajo coste, mediante una actualización del software, evitando de esta manera los gastos debidos a nuevos equipos. Esta configuración definida por software (SDR) permite a las BTS ser actualizadas desde redes GSM con GPRS y EDGE, HSPA e incluso LTE, utilizando para ello capas de transporte sobre protocolos IP. Por otra parte mejora también la accesibilidad y manejo del sistema debido a que el diseño y control de los equipos está basado en software, lo que permite el encendido y apagado de los equipos, la desactivación de los canales de RF y el ajuste del voltaje de la fuente de alimentación vía software. Los equipos que han permitido el despliegue de la estación base objeto de este proyecto son los de la serie 3900 del proveedor Huawei (BBU 3900 y la RRU 3900).

Por otra parte se ha realizado la monitorización y seguimiento de la estación, para garantizar al usuario un buen servicio y una correcta movilidad. Para poder obtener estos resultados ha sido necesario realizar un correcto diseño de la nueva estación con la tecnología y dimensionamiento más apropiado a las necesidades de los usuarios haciendo un uso eficiente del espectro radioeléctrico. Este análisis permitió identificar los defectos y puntos débiles del nuevo emplazamiento y redefinir los criterios en caso de que fuese necesario.

Una vez realizado el estudio se considera que en un futuro se puede activar el UMTS en la banda de 900 MHz capaz de coexistir con el GSM. También será posible ampliar la metodología empleada a nuevas tecnologías como LTE.



# Acrónimos

---

**3GPP** 3rd Generation Partnership Project, 15  
**8-PSK** 8 Phase Shift Keying, 27  
**ADC/DAC** Analog to Digital Conversion / Digital to Analog Conversion, 10  
**AM** Adaptive Modulation, 76  
**BBU** Baseband Unit, 62  
**BCCH** Broadcast Control Channel, 86  
**BER** Bit Error Rate, 75  
**BSC** Base Station Controller, 28  
**CDMA** Code Division Multiple Access, 33  
**CFM** Composite Fade Margin, 81  
**CPRI** Common Public Radio Interface, 62  
**DDC/DUC** Digital Down Conversion / Digital Up Conversion, 10  
**DL** Down Link, 29  
**EDGE** Enhanced Data rates for Global Evolution, 8  
**eNB** evolved Node B, 24  
**FSPL** Free-space path loss, 34  
**GERAN** GSM Edge Radio Access Network, 23  
**GGSN** Gateway GPRS Support Node, 28  
**GPRS** General Packet Radio Service, 8  
**GSM** Global System for Mobile Communications, 8  
**GTMU** GSM Timing and Main control Unit, 62  
**HSDPA** High Speed Downlink Packet Access, 18  
**HSPA** High Speed Packet Access, 7  
**HSUPA** High Speed Uplink Packet Access, 76  
**IF** Intermediate Frequency, 10  
**LMDS** Local Multipoint Distribution Service, 49  
**LoS** Line of Sight, 50  
**LTE** Long Term Evolution, 7  
**NSN** Nokia Siemens Networks, 79  
**PIRE** Potencia isotropa radiada equivalente, del inglés EIRP (equivalent isotropically radiated power), 80  
**PMP** Point to Multipoint, 50  
**PtP** Point to Point, 50  
**RAN** Radio Access Network, 8  
**RB** Radio Bearer, 45  
**RF** Radio Frequency, 66  
**RRC** Radio Resource Control, 46  
**RRU** Remote Radio Unit, 10  
**SDR** Software Defined Radio, 8  
**SGSN** Serving GPRS Support Node, 28

**Single RAN** Single Radio Access Network, 8  
**TDMA** Time Division Multiple Access, 25  
**TS** Time Slot, 28  
**UBFA** Universal BBU Fan Unit Type A, 64  
**UBRI** Universal Baseband Radio Interference board, 64  
**UEIU** Universal Environment Interface Unit, 65  
**UL** Up Link, 29  
**UMTS** Universal Mobile Telecommunications System, 7  
**UPEU** Universal Power and Environment Interface Unit, 65  
**USCU** Satellite Card Clock Unit, 104  
**UTRP** Universal Transmission Processing unit, 63  
**WBBP** WCDMA Baseband Processing unit, 63  
**WCDMA** Wideband Code Division Multiple Access, 33  
**WLL** Wireless Local Loop, 49  
**WMPT** WCDMA Main Processing Transmission unit, 63

# Bibliografía

---

- [1] B. Wan. *"Building efficient and profitable mbb networks. 2010"*.
- [2] Bloginnova Vodafone: *"<http://bloginnova.wordpress.com/2009/02/16/single-ran-el-sueno-de-un-operador-movil-ya-es-una-realidad/>"*
- [3] J. Mitola. *"Software Radio Architecture: Object oriented approaches to Wireless systems engineering."*
- [4] 'Technical Paper' de Ericsson: *"EDGE, Introduction of High-Speed data in GSM/GPRS networks"*
- [5] R. Agusti. *"LTE: nuevas tendencias en comunicaciones móviles"*.
- [6] MEF. Microwave technologies for carrier ethernet services. 2011.
- [7] Oriol Sallent Roig, José Luis Valenzuela González, Ramón Agustí Comes. *"Principios de Comunicaciones Móviles"*.
- [8] C. Shannon. A mathematical theory of communications.
- [9] Alberto Sendín Escalona. *"Fundamentos de los sistemas de comunicaciones móviles"*.
- [10] J. Perez Romero, J. Sallent, and R. Agusti. *"Radio resource management strategies in UMTS."*
- [11] Fuente: Fundación Telefónica: *"<http://sociedadinformacion.fundacion.telefonica.com>"*
- [12] Okumura. Digital mobile radio towards future generation systems. European COST 231, 1998.
- [13] Comsearch. IQlinkXG User Guide, 9.2.1.10 edition
- [14] <http://www.google.es/intl/es/earth/index.html>.Bibliografía
- [15] H. Technologies. BBU 3900 Installation Guide.
- [16] H. Technologies. RRU 3900 Installation Guide.

## Anexos

### A. Espectro radioeléctrico

El espectro radioeléctrico es un concepto fundamental en materia de telecomunicaciones, que se encuentra asociado a las comunicaciones inalámbricas y puede ser entendido como el medio en el que se propagan las ondas electromagnéticas que son empleadas en dicho tipo de comunicaciones para transmitir información (datos, imágenes, voz, sonido, etc.).

Constituye un recurso clave para muchos servicios esenciales en la sociedad: comunicaciones móviles, inalámbricas y por satélite, radiodifusión televisiva y sonora, transporte, radiolocalización (GPS/Galileo) y muchas otras aplicaciones: alarmas, controles remotos, prótesis auditivas, micrófonos, equipos médicos, reproductores de video y música, ropa, (wearable computers) etc. La tecnología de las radiocomunicaciones también respalda servicios de interés nacional tales como la defensa, la seguridad y las actividades científicas (p. ej., meteorología, observación de la Tierra, radioastronomía e investigación espacial).

La capacidad de una red puede aumentar de manera directamente proporcional al aumento de ancho de banda que pueda disponerse. Sin embargo, la asignación de espectro resulta en la práctica un proceso altamente complejo, que además lleva asociados unos plazos regulatorios y administrativos que se dilatan a lo largo de varios años.

Así por ejemplo, el espectro asignado inicialmente a GSM correspondía a la banda 890-915 MHz para el enlace de subida y 935-960 MHz para el enlace de bajada. La asignación de licencias DCS-1800 (1710-1785 MHz y 1805-1880 MHz), en el caso de España realizado en junio de 1998, constituye un claro ejemplo de incremento de capacidad por parte del operador a través del incremento de la banda disponible. En este caso, la banda adicional se repartió entre 3 adjudicatarios, al incorporarse Amena (hoy Orange) como operador.

La World Radio Conference (WRC) es un evento organizado por la International Telecommunication Union (ITU) -organismo de las Naciones Unidas-, que se suele realizar cada cuatro años y que tiene como objetivo armonizar la utilización del espectro radioeléctrico a nivel mundial. Las administraciones europeas elaboran sus posiciones técnicas de manera conjunta dentro de la CEPT (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations), si bien en última instancia las distintas administraciones europeas negocian en la ITU sobre una base nacional.

Todas las actividades de la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) en el ámbito de las radiocomunicaciones se han consolidado en el Sector de Radiocomunicaciones. La finalidad del Sector de Radiocomunicaciones es asegurar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas y la órbita de los satélites geostacionarios. Para la consecución de estos objetivos son fundamentales, entre otros medios, las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones

El Reglamento de Radiocomunicaciones es un instrumento jurídico internacional sobre las radiocomunicaciones, que rige la utilización del espectro de frecuencias radioeléctricas para la prestación de Servicios de Radiocomunicaciones.

Las Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones (CMR) pueden:

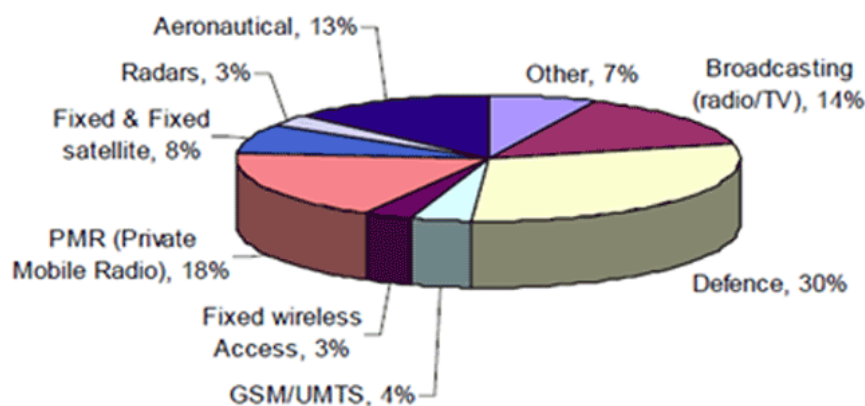
- Revisar el Reglamento de Radiocomunicaciones y cualquiera de los Planes correspondientes de asignación y adjudicación de Frecuencias.
- Examinar cualquier asunto de radiocomunicaciones de carácter mundial.
- Formular instrucciones dirigidas a la Junta del Reglamento de Radiocomunicaciones y a la Oficina de Radiocomunicaciones y revisar sus actividades.
- Determinar las cuestiones que han de ser objeto de estudio por la Asamblea de Radiocomunicaciones y sus Comisiones de Estudio, como parte de los trabajos preparatorios para futuras Conferencias de Radiocomunicaciones.

En la World Radiocommunication Conference 2007 se identificó espectro adicional para IMT-2000 e IMTAdvanced en las bandas 450-470, 698-806, 2300-2400 y 3400-3600 MHz, aunque la aplicabilidad de las bandas varía a nivel regional y nacional. No obstante, el aumento continuado del tráfico en las redes móviles, conlleva que deban considerarse todas las componentes posibles para el incremento de la capacidad. En este sentido, en los últimos años se ha planteado la reconsideración de la asignación y uso del espectro radioeléctrico frente a los procedimientos clásicos descritos anteriormente.

Una posible clasificación de los modelos de uso del espectro radioeléctrico permite distinguir los siguientes:

- *Modelo de uso exclusivo de derechos:* en este caso se realiza la asignación de licencias exclusivas a operadores para ciertas bandas de frecuencias, que pueden estar ligadas o no con el uso de una determinada tecnología y la provisión de determinados servicios.
- *Modelo de uso común del espectro:* en este caso se promueve el acceso compartido por parte de una serie de usuarios a una determinada banda del espectro radioeléctrico. La responsabilidad de la gestión de la interferencia en este caso recae directamente entre los propios usuarios.
- *Modelo de uso oportunista del espectro:* en este caso se permite que el denominado usuario secundario (que pretende acceder a una banda de espectro licenciada al denominado usuario primario) identifique de manera independiente bandas de espectro que no se estén utilizando en un cierto tiempo y lugar, pudiéndolas utilizar en ese caso siempre que se asegure que no generará interferencia dañina para el usuario primario.

La tendencia es pues, de manera clara, hacia un uso más flexible y dinámico del espectro radioeléctrico.



Atribución del espectro entre 30 MHz y 10 GHz en la UE

## B. Refarming

La recalificación de una banda para usos diferentes de los que inicialmente fueron asignados se conoce como Refarming. Por ejemplo, en España la banda de telefonía móvil de 900 Mhz fué inicialmente asignada para la tecnología GSM, lo cual impide dar servicios 3G en dicha banda. El refarming consistiría en aliviar la mencionada restricción tecnológica, lo que supondrá una mejora de la concesión. La Directiva 2009/114/CE dice que eso puede hacerse, pero respetando el equilibrio competitivo.

El 12 de Febrero de 2010 se aprobó la orden ministerial ITC/332/2010 en la que se publica el nuevo Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias. La banda de 900 Mhz que sólo estaba autorizada para GSM también podrá ser usada para tercera generación UMTS.

El nuevo CNAF es conforme con la Decisión 2009/766/CE, relativa a la armonización de las bandas de frecuencias de 900 MHz y 1800 MHz; las bandas de frecuencia 880 a 915 MHz y 925 a 960 MHz se destinarán a sistemas terrenales capaces de prestar servicios de comunicaciones electrónicas con tecnología UMTS, con las características técnicas establecidas en el anexo a la citada Decisión, debiendo garantizarse en cualquier caso la compatibilidad radioeléctrica con los sistemas GSM actualmente en funcionamiento. Por tanto, se abre la posibilidad de que puedan entrar nuevos operadores, ya que el título habilitante que poseen las operadoras que operan esas bandas debe ser modificado para poder usar UMTS en vez de GSM.

Dentro del propio modelo de uso exclusivo de derechos, spectrum refarming se refiere a la posibilidad de explotar la tecnología más conveniente en la banda más conveniente dentro de las asignadas en licencia a un operador, lo que supone un primer principio de flexibilidad espectral. La CEPT define refarming como “una combinación de medidas administrativas, financieras y técnicas, presentes y futuras, dentro de los límites de regulación de frecuencias, con el objeto de hacer una banda de frecuencia específica disponible a otro tipo de uso o tecnología. Estas medidas pueden ser a corto, medio o largo plazo”. Así, el refarming requiere de una modificación regulatoria en este caso, para permitir el uso de las bandas de 900 MHz y 1800 MHz bajo los principios de neutralidad tecnológica y de servicios, los cuales son objetivos de la política común europea.

En España existen actualmente cuatro operadores prestadores del servicio de telefonía móvil con red propia, cuya denominación y reserva de espectro figuran en la tabla siguiente<sup>1</sup>:

<b>OPERADOR</b>	<b>BANDA GSM<sup>1</sup> 900 MHz (FDD)<sup>2</sup> 880-915 MHz / 925-960 MHz</b>	<b>BANDA GSM 1.800 MHz (FDD) 1.710-1.785 MHz/ 1.805-1.880 MHz</b>	<b>BANDA UMTS 2.100 MHz<sup>3</sup> (FDD y TDD<sup>4</sup>) 1.920-1.980 MHz/ 2.110- 2.170 MHz 1.900-1.920 MHz</b>
<b>Orange</b>	2x6 MHz (2025) <sup>(*)</sup>	2x24,8 MHz (2028)	2x15+5 MHz (2030)
<b>TME</b>	2x12 MHz (2015) 2x4 MHz (2025)	2x24,8 MHz (2028)	2x15+5 MHz (2030)
<b>Vodafone</b>	2x12 MHz (2025)	2x24,8 MHz (2028)	2x15+5 MHz (2030)
<b>Yoigo</b>			2x15+5 MHz (2030)

#### Operadores móviles en España y distribución actual del espectro

Las cifras entre paréntesis indican la fecha de vigencia de las concesiones, incluida la prórroga prevista de 5 años (10 años en el caso de UMTS).